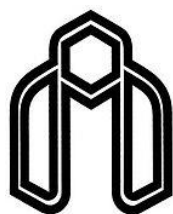


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی استخراج معدن

توسعه یک نرم افزار کامپیوتری به منظور تعیین محدوده بهینه در معادن زیرزمینی

نگارنده:

رضارضاییان فرد

استاد راهنما:

دکتر محمد عطایی

دکتر رضا کاکایی

استاد مشاور:

دکتر یاشار پور رحیمیان

مهر ۱۴۰۰

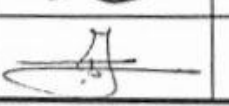
شماره: ۶۰۰۳۲۱۵۴
تاریخ: ۱۴۰۲/۰۹/۲۹
ویرایش:

باسمه تعالی
فرمهای ارزشیابی پایان نامه کارشناسی ارشد
مربوط به ورودی های ۹۴ به بعد


مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای رضا رضاییان فرد با شماره دانشجویی ۹۷۰۸۰۸۴ رشته مهندسی معدن گرایش استخراج تحت عنوان توسعه یک نرم افزار کامپیوتری به منظور تعیین محدوده نهایی در معادن زیرزمینی که در تاریخ ۱۴۰۰/۰۷/۲۷ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار شد به شرح ذیل اعلام می گردد:

الف) درجه عالی: نمره ۱۹-۲۰ ☐ (ب) درجه خیلی خوب: نمره ۱۸-۱۸/۹۹ ☒ ج) درجه خوب: نمره ۱۶-۱۷/۹۹ ☐ (د) درجه متوسط: نمره ۱۴-۱۵/۹۹ ☐ ه) کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد ☐ نوع تحقیق: ☒ نظری ☐ عملی			
عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر محمد عطایی	استاد	
۲- استاد راهنمای دوم	دکتر رضا کاکایی	استاد	
۳- استاد مشاور	دکتر پاشار پور رحیمیان	دانشیار	
۴- استاد داور اول	دکتر فرهنگ سرشکی	استاد	
۵- استاد داور دوم	دکتر سید محمد اسماعیل جلالی	دانشیار	
۶- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر رامین رفیعی	استادیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشگاه: دکتر فرهنگ سرشکی

امضاء و مهر دانشگاه:

تقدیم به پدر و مادر و همسر:

خدای رابی شاکرم که از روی کرم، پدر و مادری فداکار نصیبم ساخته تا در سایه درخت پربار وجودشان بیایم و از ریشه آنها

شاخ و برگ گیرم و از سایه وجودشان در راه کسب علم و دانش تلاش نمایم. والدینی که بودنشان تاج افتخاری است بر سرم و

نشان دلیلی است بر بودنم، چرا که این دو وجود، پس از پروردگار، مایه هستی ام بوده اند و دستم را گرفتند و راه رفتن را در این

وادی زندگی پر از فراز و نشیب آموختند. آموزگارانی که برایم زندگی، بودن و انسان بودن را معنا کردند...

تقدیم به همسر عزیزم که خوشبختی و آرامش را می‌یون صفای باطنش، هستم همسر عزیزم در طی دوران تحصیل، سختی‌های زیادی

را متحمل شدید. متانت و صبرتان را ارج می‌نهم. ضمن قدردانی، امیدوارم بتوانم زحماتتان را جبران نمایم.

تقدیر و شکر:

شکر قلبی و لسانی خود را اساتید عالی قدر جناب آقای دکتر محمد عطایی و جناب آقای دکتر رضا کاکایی که زحمات راهنمایی این پایان نامه را عهده دار گردیدند و در تمامی مراحل انجام رساله از راهنمایی های مدبرانه ایشان استفاده نمودم ابراز می دارم و توفیقات روز افزون ایشان را توأم با صحت و سعادت خواستارم.

از جناب آقای دکتر یاشار پور رحیمیان که در امر مشاوره این رساله مساعدت نمودند و در این امر نهایت مراقبت، توجه و دقت خود را مبذول فرموده اند کمال شکر و امتنان را دارم و برای ایشان از خداوند سلامت و سعادت ابدی را خواهانم.

از جناب آقای مهندس سجاد زارعی که یافتن موضوع مورد علاقه و دنیای خود را در نقطه اوج بحران مدیون همکاری ها و راهنمایی های بی دریغ ایشان هستم؛ و نمی دانم که با چه زبانی و با کد این واژگان محبتشان را ارج نهم بی نهایت سپاسگزارم و به راستی انجام این رساله بدون نظر های صائب، پیکیری های دلسوزانه و تشویق های امیدبخش ایشان میسر نبود. لطف و مهربانی بی شائبه شان همیشه در خاطر من خواهد ماند.

تعهدنامه

اینجانب رضا رضاییان فرد دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی معدن گرایش استخراج دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه توسعه یک نرم افزار کامپیوتری به منظور تعیین محدوده بهینه در معادن زیرزمینی، تحت راهنمایی دکتر محمد عطایی و دکتر رضا کاکایی متعهد می شوم:

- تحقیقات این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش های محقق های دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا افراد دیگر برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج پایان نامه تأثیرگذار بوده اند رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

امضاء: رضا رضاییان فرد

تاریخ: ۱۴۰۰/۰۹/۲۹

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود. استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

بهینه‌سازی یکی از اصلی‌ترین جنبه‌های فرایند برنامه‌ریزی و طراحی است تعدادی الگوریتم و روش برای بهینه‌سازی معادن ارائه شده است. اکثر روش‌ها و الگوریتم‌ها به معادن روباز متعلق می‌باشند و این امر باعث شده است بسیاری از محققین استدلال می‌کنند که بهینه‌سازی معادن روباز به حد اشباع رسیده است. بهینه‌سازی معادن زیرزمینی در چند دهه اخیر با تمرکز به سه زمینه اصلی از جمله بهینه‌سازی مرزهای کارگاه استخراجی مورد توجه قرار گرفته است.

هدف این تحقیق بهبود و توسعه الگوریتمی بر مبنی دو الگوریتم سنس و توپال و الگوریتم ساندانیک و همکاران می‌باشد. در این تحقیق یک الگوریتم برای تعیین محدوده نهایی معادن زیرزمینی تحت عنوان Stope Bondaries Optimization 3D (SBO3D) ارائه شده است. الگوریتم ارائه داده شده از چهار مرحله اصلی تولید مدل بلوکی اقتصادی، تولید کارگاه‌های محتمل، در نظر گرفتن تمام کارگاه‌های دارای ارزش اقتصادی مثبت کنار یکدیگر و در نهایت حذف بلوک‌هایی که چندین بار در محاسبات ارزش نهایی تکرار شده‌اند تشکیل شده است. این الگوریتم در محیط برنامه‌نویسی Python کدنویسی شده است.

در آخرین قسمت از این تحقیق الگوریتم ارائه داده شده با استفاده از یک مدل دو بعدی فرضی با الگوریتم ساندانیک مقایسه شده است و نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم ارائه داده شده سودآوری بیشتری نسبت به الگوریتم ساندانیک داشته و سپس با استفاده از داده‌های مربوط به معدن سرب و روی انگوران این الگوریتم در حالت سه‌بعدی با الگوریتم ساندانیک مقایسه شده که نتیجه این قیاس افزایش ۴۲ درصد سودآوری نسبت به الگوریتم ساندانیک بوده است.

فهرست مطالب

فصل اول	۱
۱-۱- مقدمه	۲
۱-۲- ضرورت انجام تحقیق	۴
۱-۳- هدف و روش انجام تحقیق	۴
۱-۴- ساختار پایان نامه	۵
فصل دوم	۷
۱-۲- مقدمه	۸
۲-۲- استخراج زیرزمینی	۹
۳-۲- بهینه سازی محدوده نهایی معادن زیرزمینی	۹
۱-۳-۲- منطق الگوریتم های بهینه سازی	۱۰
۲-۳-۲- نحوه عملکرد الگوریتم های بهینه سازی	۱۰
۳-۳-۲- الگوریتم های طراحی محدوده معدنکاری زیرزمینی	۱۱
الف- الگوریتم برنامه ریزی پویا	۱۱
ب- الگوریتم تقسیم هشت گانه	۱۲
ج- الگوریتم کارگاه شناور	۱۲
د- الگوریتم با ارزش ترین همسایگی	۱۳
ه- الگوریتم شاخه و حد	۱۹
و- الگوریتم شناورسازی کارگاه های متعدد	۱۹
ز- الگوریتم برنامه ریزی عدد صحیح مختلط	۲۰
ح- الگوریتم سنس و توپال	۲۱
ط- الگوریتم شبکه جریان	۲۴
ی- الگوریتم الیپس	۲۴
ک- الگوریتم حریصانه	۲۵

ل- الگوریتم جزگرا SOA	۲۵
م- الگوریتم ساندانیک و همکاران	۲۶
۱- تهیه مدل بلوکی عیاری با بلوک‌های یکسان	۲۷
۲- تهیه مدل بلوکی اقتصادی	۲۸
۳- تولید کارگاه‌های محتمل زیرزمینی	۲۹
۴- تولید مجموعه‌های غیر همپوشان	۳۱
ن- الگوریتم نیک‌بین و همکاران	۳۳
س- الگوریتم ترکیبی تقریبی سه‌بعدی	۳۴
ع- الگوریتم متامورس و کمرال	۳۵
۳-۴- جمع‌بندی	۳۵
فصل سوم	۳۷
۳-۱- مقدمه	۳۸
۳-۲- الگوریتم SBO3D	۳۸
۳-۳- تهیه مدل بلوکی اقتصادی	۴۰
۳-۴- تولید کارگاه‌های محتمل زیرزمینی	۴۱
۳-۵- شیوه حرکت کارگاه استخراجی	۴۲
۳-۶- تولید مجموعه کارگاه‌های غیرهمپوشان	۴۴
۳-۷- ویرایش محدوده نهایی	۴۶
۳-۸- مثال دوبعدی	۴۸
۳-۸-۱- حل مسئله با استفاده از الگوریتم ساندانیک	۴۹
۳-۸-۲- حل مسئله با استفاده از الگوریتم SBO3D	۵۲
۳-۱۰- برنامه‌نویسی الگوریتم	۵۳
۳-۱۰-۱- ورودی الگوریتم	۵۴
۳-۱۰-۲- خروجی الگوریتم	۵۶
۳-۱۱- مطالعه موردی	۵۷

۵۷	 ۱۲-۳-مدل سه‌بعدی
۵۹	 ۱۳-۳-جمع‌بندی
۶۱	 فصل چهارم
۶۲	 ۱-۴-مقدمه
۶۲	 ۲-۴-نتایج
۶۳	 ۳-۴-پیشنهادهات
۶۵	 منابع

فهرست اشکال

- شکل ۱-۲: کارگاه‌های محتمل در همسایگی بلوک B ۱۴
- شکل ۲-۲: مدل یک بعدی ۱۵
- شکل ۳-۲: جواب نهایی مدل یک بعدی ۱۸
- شکل ۴-۲: همپوشانی کارگاه‌های احتمالی ۲۳
- شکل ۵-۲: تبدیل مدل بلوکی با ابعاد بلوک متفاوت به مدل بلوکی با ابعاد یکسان ۲۸
- شکل ۶-۲: چهار کارگاه احتمالی با ابعاد $2 \times 3 \times 2$ در مدل بلوکی $3 \times 3 \times 3$ ۳۰
- شکل ۷-۲: مشخصات کارگاه استخراجی ۳۰
- شکل ۸-۲: کارگاه‌های دارای ارزش اقتصادی مثبت ۳۳
- شکل ۱-۳: مراحل الگوریتم پیشنهادی ۳۹
- شکل ۲-۳: فایل Excel ورودی الگوریتم ۴۰
- شکل ۳-۳: مدل بلوکی اقتصادی ۴۱
- شکل ۴-۳: مدل بلوکی دوبعدی شامل ۲۵ بلوک ۴۳
- شکل ۵-۳: کارگاه‌های احتمالی به ابعاد 3×3 ۴۳
- شکل ۶-۳: کارگاه‌های دارای ارزش اقتصادی مثبت ۴۵
- شکل ۷-۳: ویرایش محدوده نهایی ۴۷
- شکل ۸-۳: نمای کلی از الگوریتم پیشنهادی ۴۷
- شکل ۹-۳: مدل بلوکی عیاری روی (٪) ۴۸
- شکل ۱۰-۳: مدل بلوکی اقتصادی (ارزش بلوک‌ها بر حسب دلار) ۴۹
- شکل ۱۱-۳: کارگاه‌های محتمل با ارزش اقتصادی مثبت ۵۰
- شکل ۱۲-۳: محدوده بهینه قبل از ویرایش ۵۲
- شکل ۱۳-۳: محدوده نهایی حاصل از استفاده از الگوریتم ساندانیک پس از ویرایش ۵۲
- شکل ۱۴-۳: محدوده بهینه قبل از ویرایش ۵۳
- شکل ۱۵-۳: محدوده نهایی حاصل از استفاده از الگوریتم پیشنهادی ۵۳

- شکل ۳-۱۶: نرم‌افزار کامپیوتری تعیین محدوده بهینه استخراج معادن زیرزمینی ۵۵
- شکل ۳-۱۷: فایل خروجی الگوریتم ۵۶
- شکل ۳-۱۸: شکل سه‌بعدی محدوده نهایی ۵۸
- شکل ۳-۱۹: محدوده نهایی محاسبه شده با استفاده از الگوریتم ساندانیک ۵۹
- شکل ۴-۱: محدوده بهینه قبل از ویرایش ۶۴

-

فهرست جداول

- جدول ۱-۳: بلوک‌های تکراری حذف شده ۴۶
- جدول ۲-۳: ارزش اقتصادی کارگاه‌های محتمل ۴۹
- جدول ۳-۳: مشخصات و ارزش اقتصادی هر یک از مجموعه‌های محدوده نهایی ۵۱
- جدول ۴-۳: پارامترهای ورودی الگوریتم ۵۵
- جدول ۱-۴: مقایسه دو الگوریتم SBO3D و الگوریتم ساندانیک ۶۳

فصل اول:

کلیات

۱-۱- مقدمه

ذخایر معدنی جز منابع ملی هر کشور محسوب می‌شوند. ذخایر معدنی اعم از فلزی و غیرفلزی با توجه به عمق کانسار و شرایط زمین‌شناسی با روش‌های سطحی و زیرزمینی استخراج می‌شوند. بدین صورت که ذخایر نزدیک به سطح زمین با روش‌های مختلف معدنکاری روباز استخراج می‌شوند و با افزایش عمق روش مورد استفاده برای استخراج به روش‌های معدنکاری زیرزمینی تمایل پیدا خواهد کرد.

نظر به اینکه روش‌های متعددی برای استخراج معادن زیرزمینی وجود دارد، بنابراین بایستی با توجه به مشخصات کانسار نظیر نوع، شکل، عمق، شیب و تمام پارامترهایی که در انتخاب روش استخراج معادن تأثیرگذار هستند، روش‌های مناسب که قابل اجرا بوده را انتخاب و پس از بررسی‌های اقتصادی، مطلوب‌ترین روش استخراجی را برگزید. اولین مرحله برای طراحی معادن روباز و زیرزمینی استفاده از داده‌های اکتشافی نظیر اطلاعات زمین

شناسی، عیار حاصل از داده‌های گمانه‌ای و محدودیت‌های منطقه‌ای و غیره است. بدین صورت که ابتدا با استفاده از نرم‌افزارهای معدنی محدوده اولیه کانسار مدل‌سازی می‌شود؛ سپس مدل اولیه ساخته شده توسط نرم‌افزارهای معدنی با استفاده از روش‌های زمین آماری تخمین عیار شده و به مدل بلوکی زمین‌شناسی تبدیل خواهد شد تا شرایط برای طراحی معدن با توجه به سایر پارامترهای فنی اقتصادی آغاز شود. از آنجایی که معدنکاری نیازمند هزینه‌های اولیه و سرمایه‌گذاری سنگین برای تجهیز، باطله برداری و دیگر هزینه‌ها همچون آماده‌سازی منطقه از لحاظ دسترسی است از طرفی وجود عدم قطعیت‌های فنی و اقتصادی طراحان بایستی به بررسی و مطالعه بیشتری جهت طراحی معادن بپردازند. از اوایل ۱۹۶۰ روش‌ها و الگوریتم‌های بهینه‌ساز مختلفی برای انواع مسائل و موضوعات معدنی مطرح شده‌اند. بعضی از آن‌ها توانستند، تغییرات اساسی و چشمگیری در زمینه طراحی برنامه‌ریزی معادن روباز ایجاد نمایند. با این حال بهینه‌سازی معادن زیرزمینی طی ۱۵ تا ۲۰ سال گذشته با تمرکز بر روی سه زمینه توجه بیشتری را به خود جلب کرده است که شامل: بهینه‌سازی زیرساخت، بهینه‌سازی مرزهای کارگاه‌های استخراجی و بهینه‌سازی برنامه‌ریزی تولید با استفاده از مرزهای کارگاه استخراجی از پیش تعیین شده می‌باشد (Sens and Topal, 2008 & 2010).

امروزه بهینه‌سازی مهم‌ترین پارامتر طراحی معادن است بنابراین بایستی تمرکز بیشتری بر روی آن صورت گیرد. از آنجا که معادن می‌توانند ذخایر مالی بسیار خوبی برای هر کشور باشند، در نتیجه بهبود این صنعت می‌تواند تأثیر بسزایی در اقتصاد کشورها داشته باشد. اما با این حال بیشتر مطالعات و تحقیقات انجام شده تا به امروز در مورد معدن‌کاری سطحی بوده و توجه کمتری به معدن‌کاری زیرزمینی شده است.

طراحی معادن زیرزمینی سال‌ها به صورت دستی انجام شده است و هنگامی که کامپیوتر وارد این صنعت شد، جهشی در بهبود عملیات معدنکاری صورت گرفت. از آنجایی که بهینه‌سازی معادن زیرزمینی نسبت به معادن روباز نیاز به دقت و در نظر گرفتن پارامترها و فاکتورهای بیشتری دارد بنابراین بایستی مطالعات بیشتری برای بهینه‌سازی معادن زیرزمینی انجام گیرد.

۱-۲- ضرورت انجام تحقیق

با توجه به اینکه منابع معدنی جز منابع تجدیدناپذیر هستند، بایستی مطالعات قبلی را با جدیت و با دقت بیشتر در جهت بهبود صنعت معدنکاری مورد بررسی قرارداد. صنعت معدنکاری صنعتی پرهزینه و پرریسک است که نیازمند اطلاعات و مطالعات دقیق و ارائه روش‌های استخراجی است تا بتوان هزینه‌ها، سرمایه‌گذاری و ریسک مربوطه را کاهش داد. با توجه به اینکه استخراج زیرزمینی دارای روش‌های متعددی می‌باشد و این روش‌ها به دلیل داشتن دوباره بایستی به شکل دقیق مورد بررسی قرار گرفته و روش استخراج مناسب با توجه به شرایط فنی اقتصادی کانسار مربوطه انتخاب شود. در این راستا الگوریتم‌های زیادی برای طراحی معادن زیرزمینی نظیر الگوریتم سنس و توپال^۱ و الگوریتم ساندانیک و همکاران^۲ ارائه شده است. در صورتی که الگوریتم‌های ارائه شده هر کدام به نحوی توانایی تولید محدوده نهایی بهینه را نداشته با توجه به این مسئله در این پایان‌نامه یک الگوریتم بر مبنی دو الگوریتم ذکر شده در راستای بهبود الگوریتم ساندانیک ارائه و توسعه داده شده است. در نهایت، محدوده نهایی کانسار زیرزمینی بر اساس عیار و ارزش خالص فعلی بایستی در نزدیک‌ترین حالت ممکن به حالت بهینه باشد.

۱-۳- هدف و روش انجام تحقیق

تاکنون الگوریتم‌ها و روش‌های مختلفی برای بهینه‌سازی و طراحی کارگاه‌های زیرزمینی ارائه شده است؛ در این تحقیق به بررسی دو الگوریتم ساندانیک و همکاران و توپال و سنس که در زمینه طراحی و چیدمان کارگاه‌های استخراجی کاربرد دارند، پرداخته شده و با توجه به این که هدف از این پایان‌نامه توسعه یک نرم‌افزار برای تعیین محدوده نهایی معادن زیرزمینی می‌باشد بایستی بر مبنای بررسی و مقایسه دو الگوریتم مذکور یک

۱. Sens and Topal

۲. Sandanayake et al

نرم افزار در راستای بهینه سازی و طراحی کارگاه های زیرزمینی توسعه داده شود. برای دستیابی به هدف بالا در اولین مرحله بایستی طی مطالعات کتابخانه ای مفهوم دو الگوریتم به صورت دقیق برگرفته شود تا بتوان از لحاظ کدنویسی آن ها را مورد بررسی و مقایسه قرارداد. در مرحله بعد باید با توجه به ویژگی و معایب این دو الگوریتم نرم افزار کامپیوتری توسعه داده شود که بتواند توالی کارگاه های استخراجی را مشخص کند. در نهایت به منظور اعتبارسنجی این نرم افزار با استفاده از داده های واقعی مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۱-۴- ساختار پایان نامه

این پایان نامه از چهار فصل تشکیل شده است که در زیر به توضیح مختصری از هر فصل پرداخته شده است:

در فصل اول که با عنوان "کلیات" یاد شده است به بیان مسئله، ضرورت و هدف انجام تحقیق و روش انجام آن پرداخته شده است.

فصل دوم با عنوان "مبانی نظری و پیشینه تحقیق" به بررسی و تشریح مختصر تحقیقات و مطالعات در مورد الگوریتم های بهینه ساز معادن زیرزمینی پرداخته شده است.

فصل سوم با عنوان "طراحی چیدمان کارگاه های استخراجی"، ابتدا در مورد الگوریتم ارائه شده در این تحقیق بحث شده است و در نهایت به مقایسه نتایج این الگوریتم با دیگر الگوریتم ها پرداخته شده است.

در فصل چهارم که تحت عنوان "نتیجه گیری و پیشنهادات" یاد شده است به نتایج مهم این تحقیق اشاره و پیشنهاداتی برای بهبود تحقیقات بعدی ارائه شده است.

فصل دوم:

مبانی و پیشینه تحقیق

۲-۱- مقدمه

بهینه‌سازی بر اساس ارزش اقتصادی کارگاه‌ها انجام می‌شود. هدف این است که کارگاه‌های استخراجی به‌گونه‌ای جانمایی شوند که بتوان با استخراج آن‌ها قسمت‌های سودآوری که دارای بیشترین پتانسیل عیاری و اقتصادی هستند را به دست آورد. این کار با در نظر گرفتن چند محدودیت صورت می‌گیرد. طراحی معدن و برنامه‌ریزی تولید معدن برای یک عملیات معدنکاری ضروری است زیرا علاوه بر طرح و محدوده نهایی معدن قدرت اقتصادی و موفقیت عملیات معدن را تعیین می‌کند. در این راستا پیشنهادها و الگوریتم‌های متفاوتی که بعضاً برای نوع خاصی از روش‌های استخراج زیرزمینی قابل‌استفاده بوده طی چند دهه گذشته برای طراحی و چیدمان کارگاه‌های استخراج ارائه شده است که در این فصل برای دستیابی به اهداف پایان‌نامه به بررسی الگوریتم‌های ارائه شده تا به امروز پرداخته شده است.

۲-۲- استخراج زیرزمینی

با توجه به اینکه نیاز بشر به مواد معدنی روز به روز در حال افزایش است و همچنین با افزایش عمق معادن روباز، روش استخراج مواد معدنی میل به استخراج به روش زیرزمینی پیدا می‌کنند، امروزه استخراج به صورت زیرزمینی توجه بیشتری را نسبت به روش‌های روباز به خود جلب کرده است. روش استخراج زیرزمینی خود به سه دسته که شامل روش‌های با نگهداری، خود نگهدار و تخریبی تقسیم شده که هر دسته خود شامل چند روش منحصر به فرد می‌شود (عطایی، ۱۳۸۴). روش‌های اتاق و پایه، کارگاه و پایه، انبارهای، استخراج از طبقات فرعی و VCR در زمره روش‌های خودنگهدار قرار می‌گیرند. روش‌های کندن و پر کردن، کرسی چینی و استخراج ستونی در گروه روش‌های بانگهداری و روش‌های جبهه‌کار طولانی، جبهه‌کار کوتاه، تخریب در طبقات فرعی و تخریب بلوکی در گروه روش‌های تخریبی قرار دارند.

۲-۳- بهینه‌سازی محدوده نهایی معادن زیرزمینی

از آنجایی که صنعت معدنکاری صنعتی پرهزینه و نیازمند سرمایه‌گذاری زیادی است، بایستی برای کاهش هزینه‌ها مانند هزینه باطله برداری و آماده‌سازی معدن و همچنین برای افزایش درآمد حاصل از استخراج مواد و فروش آن بهینه‌سازی صورت گیرد. در همین راستا محققین طی چند دهه گذشته به بهینه‌سازی بخش‌های مختلف معدن پرداخته‌اند. یکی از مهم‌ترین بهینه‌سازی‌ها بررسی بهترین حالت ممکن برای طراحی محدوده نهایی معدن زیرزمینی می‌باشد زیرا که تأثیر به‌سزایی در هزینه‌ها مانند آماده‌سازی دارد. همان‌طور که گفته شد در چند دهه اخیر محققین الگوریتم‌هایی برای بهینه‌سازی محدوده نهایی معادن و همچنین سودآوری بیشتر ارائه کرده‌اند که هر کدام دارای مزایا و معایبی است، در ادامه به توضیح و بررسی این الگوریتم‌ها پرداخته خواهد شد.

۲-۳-۱- منطق الگوریتم‌های بهینه‌سازی

به‌طور کلی الگوریتم‌های موجود برای بهینه‌سازی محدوده نهایی معدنکاری را از نظر منطق مورد استفاده در آن‌ها می‌توان به دودسته الگوریتم‌های دارای منطق ریاضی^۱ و الگوریتم‌های دارای منطق ابتکاری^۲ مجزا کرد. الگوریتم‌های دارای منطق ریاضی به آن دسته از الگوریتم‌ها اشاره دارند که با توجه به محدودیت‌های بهینه‌سازی محدوده معدنکاری، همیشه توانایی یافتن محدوده بهینه واقعی را دارند. الگوریتم‌هایی که از منطق ابتکاری استفاده می‌کنند، هرچند محدوده بهینه واقعی معدنکاری را تضمین نمی‌کنند اما به دلیل در نظر گرفتن محدودیت‌های فنی بیشتر محبوبیت بیشتری نسبت به الگوریتم‌های دارای منطق ریاضی از محبوبیت بیشتری برخوردارند (عطایی، ۱۳۸۴).

۲-۳-۲- نحوه عملکرد الگوریتم‌های بهینه‌سازی

الگوریتم‌های موجود برای بهینه‌سازی محدوده معدنکاری زیرزمینی از نظر نحوه عملکرد به دو گروه جزگرا و کل‌گرا تقسیم می‌شوند. الگوریتم‌هایی که بر روی تمام محدوده معدنی مدل‌سازی شده اجرا می‌شوند و محدوده بهینه را جستجو می‌کنند الگوریتم‌های کل‌گرا گویند. در این روش‌ها پس از یافتن محدوده بهینه استخراج، محدوده موردنظر به پهنه‌های طبقات استخراجی تقسیم می‌شود. گروه دیگر الگوریتم‌هایی هستند که در آن‌ها ابتدا محدوده معدنی به طبقات یا پهنه‌های استخراجی تقسیم شده و سپس الگوریتم موردنظر بر روی هر طبقه یا پهنه به‌طور مجزا اجرا می‌شوند. در این گروه محدوده بهینه استخراج در هر طبقه یا پهنه، محدوده بهینه بر روی کل محدوده معدنی جانمایی می‌شود. این دسته الگوریتم‌ها را الگوریتم‌های جزگرا می‌نامند (جلالی و حسینی، ۱۳۸۸).

۱. Rigorous

۲. Heuristic

۲-۳-۳- الگوریتم‌های طراحی محدوده معدن کاری زیرزمینی

همان‌طور که ذکر شد، طراحی چیدمان کارگاه‌های استخراجی به نوعی که توان ارزش خالص فعلی بیشتری را حاصل کند یک امر مهم و حیاتی در عملیات معدنکاری است. در این راستا محققین طی پژوهش‌هایی که انجام داده‌اند، الگوریتم‌ها و روش‌هایی برای طراحی محدوده نهایی معدن کاری زیرزمینی ارائه کرده‌اند. در ادامه به بررسی توضیح این الگوریتم‌ها پرداخته می‌شود.

الف- الگوریتم برنامه‌ریزی پویا^۱

الگوریتم برنامه‌ریزی پویا توسط ریڈل^۲ در سال ۱۹۷۷ ارائه شد. ریڈل، الگوریتم خود را برای تعیین مرزهای کارگاه معادن زیرزمینی به روش تخریب بلوکی ارائه داد. روش حل این الگوریتم بدین شکل است که ابتدا فرض بر این است که کمر پایینی در فرایند بهینه‌سازی وجود ندارد و حداکثر سود بدون در نظر گرفتن کمر پایین برای کانسار به وجود می‌آید. برای استفاده این الگوریتم در سه بعد بایستی مقطع‌های قائم کانسار با فاصله‌های برابر تهیه و برای تعیین محدوده نهایی هر مقطع به صورت جداگانه بررسی شود. تحت این شرایط ممکن است محدوده‌های نهایی در مقاطع پشت سرهم از نظر فنی و هندسی همخوانی نداشته باشند و نیاز به همسان‌سازی مقاطع احساس شود. نتیجتاً این الگوریتم توانایی به‌دست‌آوردن محدوده معدنکاری بهینه نخواهد داشت و همچنین به دلیل نتایج متفاوت این الگوریتم بر روی مدل‌های دوبعدی پیشنهاد شده است که این الگوریتم یک بار بر روی مقاطع شرقی - غربی و بار دیگر بر روی مقاطع شمالی - جنوبی امتحان شده و نتیجه بهتر به‌عنوان جواب موردنظر انتخاب شود (جلالی، ۱۳۸۵ و Riddle, 1977).

۱. Dynamic Programming Algorithm

۲. Riddle

ب- الگوریتم تقسیم هشت گانه^۳

چیمانوف و همکاران^۴ در سال ۱۹۸۹، الگوریتمی با عنوان الگوریتم تقسیم هشت گانه را ارائه دادند. در طول کار این الگوریتم، بعد از جمع آوری اطلاعات گمانه‌ای، الگوریتم ابتدا شروع به بررسی و تحلیل داده‌های زمین آماری و شکل‌های مواد معدنی می‌پردازد. سپس، به وسیله مدل هندسی، الگوریتم به شناسایی ذخیره‌ها بر اساس ارزش اقتصادی پرداخته و توالی معدنکاری را مشخص می‌کند. در نهایت، حجم قابل معدنکاری با حذف پی‌درپی زیر حجم‌ها در داخل تقسیمات هشت گانه که حداقل ابعاد کارگاه را داشته باشند را مشخص می‌کند. نقطه ضعف این الگوریتم این است که بلوک‌های با ابعاد حداقل، بدون در نظر گرفتن مقدار ماده معدنی موجود در آن، در محدوده نهایی قرار خواهد گرفت که این مسئله موجب کاهش سودآوری یک عملیات معدنی به عنوان مثال در مکان‌هایی که مقدار زیادی از باطله وجود دارد باعث نزول سودآوری خواهد شد (Cheimanoff et al, 1989).

ج- الگوریتم کارگاه شناور^۱

آلفرد^۲ یک روش بهینه‌سازی تحت عنوان کارگاه شناور را در سال ۱۹۹۵ ارائه کرد. این الگوریتم هم‌اکنون در نرم‌افزاری تجاری Datamine (CAE Studio, 2014) وجود دارد. در طول فرایند این الگوریتم، یک کارگاه با ابعاد مشخص در کل توده ماده معدنی از یک نقطه از قبل مشخص شده در سه جهت X ، Y و Z به صورت شناور شروع به حرکت می‌کند. در طول فرایند شناورسازی، عیار متوسط هر کارگاه (میانگین عیار بلوک‌های داخل آن کارگاه) محاسبه می‌شود. کارگاه‌هایی که بایستی در محدوده نهایی معدنکاری زیرزمینی قرار گیرند با توجه به تابع هدف که می‌تواند توان تولید، بالاترین عیار و یا بیشترین ارزش اقتصادی باشد؛ انتخاب می‌شوند. نقطه ضعف این

۳. Octree-Division Algorithm

۴. Cheimanoff et al

۱. Floating Stope Algorithm

۲. Alford

الگوریتم، تولید کارگاه‌های همپوشان با بلوک‌های مشترک است. زیرا یک بلوک ماده معدنی نمی‌تواند به چندین کارگاه تعلق داشته باشد. در نتیجه، ارزش اقتصادی بلوک‌های مشترک بیشتر از یک‌بار در ارزش اقتصادی کل محدوده معدنکاری محاسبه می‌شود. همچنین در این الگوریتم لزومی بر متناسب بودن ابعاد کارگاه و ابعاد بلوک‌ها نمی‌باشد زیرا که از منطق ریاضی پیروی نمی‌کند (جلالی، ۱۳۸۵ و Alford, 1995)

د- الگوریتم با ارزش‌ترین همسایگی^۱

عطایی‌پور در سال ۱۹۹۷ الگوریتم ابتکاری به نام با ارزش‌ترین مقدار همسایگی (MNV) را برای بهینه سازی محدوده کارگاه استخراج در حالت سه بعدی ارائه نمود در صورتی امکان تولید جواب بهینه وجود ندارد. این الگوریتم، مانند الگوریتم کارگاه شناور بوده ولی با روشی متفاوت از روش کارگاه شناور، کارگاه‌ها را تعریف کرده است. در الگوریتم با ارزش‌ترین همسایگی ابتدا برای تعریف کارگاه استخراجی دو مفهوم SBR و O_{nb} بایستی محاسبه شود. در صورتی که مدل بلوکی دوبعدی باشد نتایجاً از هر مفهوم دو مقدار محاسبه خواهد شد (Ataee-pour, 1997). محاسبه این دو مفهوم برای مدل بلوکی دو بعدی به صورت زیر می‌باشد:

$$SBR_1 = \frac{\text{حداقل طول کارگاه}}{\text{طول هر بلوک}} \quad ۱-۲$$

$$SBR_2 = \frac{\text{حداقل عرض کارگاه}}{\text{عرض هر بلوک}} \quad ۲-۲$$

$$O_{nb_1} = [SBR_1 - 0.01] + 1 \quad ۳-۲$$

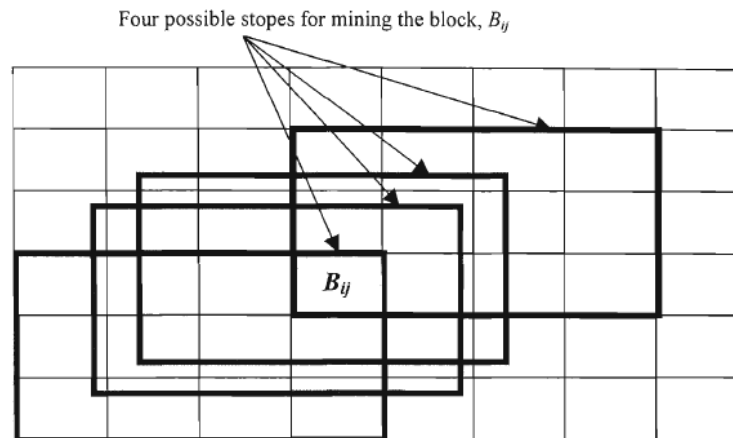
$$O_{nb_2} = [SBR_2 - 0.01] + 1 \quad ۴-۲$$

۱. Maximum Value Neighborhood Algorithm

۲. Stope block ratio

۳. Order of neighbourhood

پس از محاسبه مفاهیم اولیه برای تعریف ابعاد کارگاه استخراجی مطابق شکل ۲-۲ تمام حالات را برای بلوک های مثبت بررسی کرده و هر حالت یک همسایگی نام گذاری و با 4NB نشان داده می شود.



شکل ۲-۱: کارگاه های محتمل در همسایگی بلوک B (Ataee-pour, 1997)

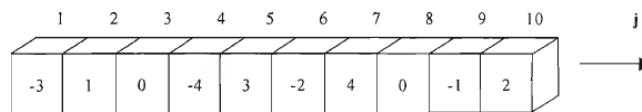
در این شکل چهار همسایگی برای بلوک B_{ij} تعریف شده است. پس از مشخص نمودن هر همسایگی ارزش بلوک های درون همسایگی تحت عنوان 5NBV محاسبه شده و در نهایت با ارزش ترین همسایگی مثبت به مجموعه 6SEV که جواب نهایی است، اضافه می شود. در این الگوریتم دو مفهوم دیگر با نام های F و FF وجود دارد که تابعی برای استخراج یا عدم استخراج هر بلوک می باشند. در صورتی که بلوکی در یکی از همسایگی هایی که به عنوان با ارزش ترین همسایگی انتخاب شده است قرار گرفته باشد مقدار F آن بلوک برابر با ۱ و مقدار FF آن برابر با صفر خواهد بود. این شرایط نشان دهنده این است که بلوک مورد نظر از قبل جز محدوده نهایی قرار گرفته و از تکرار مجدد جلوگیری خواهد شد. تابع FF به صورت زیر می باشد:

$$FF = \begin{cases} 1 & \text{if } F = 0 \\ 0 & \text{if } F = 1 \end{cases} \quad ۵-۲$$

۴. Neighbourhood
۱. Neighbourhood value
۲. Stope economic value

پس از انتخاب با ارزش ترین همسایگی بایستی با توجه به تابع استخراج یا عدم استخراج بلوک های درون همسایگی انتخاب شده در صورت مثبت بودن مقدار نهایی آن همسایگی به SVE افزوده شود.

مدل یک بعدی با حداقل طول ۲۵ متر و طول هر بلوک ۱۰ متر شکل ۲-۳ را در نظر بگیرید:



شکل ۲-۳: مدل یک بعدی

$$SBR = \frac{\text{حداقل طول کارگاه}}{\text{طول هر بلوک}} = \frac{25}{10} = 2.5$$

$$O_{nb} = [SBR_1 - 0.01] + 1 = [2.5 - 0.01] + 1 = 3$$

طول کارگاه برابر است با ۳ یعنی هر کارگاه ۳ بلوک را شامل خواهد شد.

بلوک ۱:

از آنجایی که بلوک ۱ جز هیچ همسایگی که دارای ارزش اقتصادی مثبت نمی باشد در نتیجه $F_1=0$ خواهد شد و همچنین چون بلوک ۱ ارزش اقتصادی منفی دارد پس مورد بررسی قرار نخواهد گرفت و بلوک بعدی یعنی بلوک شماره ۲ بررسی خواهد شد.

$$F_1=0, \text{ ارزش بلوک ۱} = -3$$

بلوک ۲:

این بلوک تا این قسمت از حل مسئله جز هیچ همسایگی دارای ارزش مثبت نبوده در نتیجه $F_2=0$ اما ارزش اقتصادی مثبت دارد پس بایستی همسایگی های محتمل این بلوک بررسی شود. همسایگی های محتمل به صورت زیر می باشند:

$$F_2=0, \text{ ارزش بلوک ۲} = \text{مثبت}$$

$$NB_1 = \{-3, 1, 0\} \Rightarrow NBV_1 = -3 + 1 + 0 = -2$$

$$NB_2 = \{1, 0, -4\} \Rightarrow NBV_2 = 1 + 0 - 4 = -3$$

NB₁ به عنوان با ارزش ترین همسایگی نسبت به دیگر همسایگی انتخاب شده اما چون ارزش منفی دارد کنار گذاشته خواهد شد.

بلوک ۳:

بلوک شماره ۳ ارزش اقتصادی غیر منفی و برابر با صفر می باشد پس مورد بررسی قرار گرفته خواهد شد و چون جز بلوک های همسایگی که ارزش اقتصادی مثبت داشته قرار نگرفته است مقدار F_3 برابر با صفر می باشد.

$$F_3=0, \text{ ارزش بلوک } 3 = \text{صفر}$$

$$NB_1=\{-3, 1, 0\} \implies NBV_1 = -3 + 1 + 0 = -2$$

$$NB_2=\{1, 0, -4\} \implies NBV_2 = 1 + 0 - 4 = -3$$

$$NB_3=\{0, -4, 3\} \implies NBV_2 = 0 - 4 + 3 = -1$$

NB₃ به عنوان با ارزش ترین همسایگی در بین همسایگی های موجود انتخاب شده اما چون ارزش منفی دارد در نظر گرفته نخواهد شد.

بلوک ۴:

بلوک شماره ۴ مطابق بلوک های قبل جز هیچ همسایگی دارای ارزش اقتصادی مثبت نمی باشد و مقدار تابع استخراجش برابر با صفر می باشد و همچنین چون ارزش اقتصادی منفی دارد در روند الگوریتم قرار نخواهد گرفت.

$$F_4=0, \text{ ارزش بلوک } 4 = -4$$

بلوک ۵:

بلوک ۵ دارای ارزش اقتصادی مثبت و مقدار تابع استخراج صفر می باشد و بایستی همسایگی های محتمل این بلوک بررسی شود.

$$F_5=0, \text{ ارزش بلوک } 5 = 3$$

$$NB_1=\{0, -4, 3\} \implies NBV_1 = 0 - 4 + 3 = -1$$

$$NB_2=\{-4, 3, -2\} \implies NBV_2 = -4 + 3 - 2 = -3$$

$$NB_3 = \{3, -2, 4\} \implies NBV_3 = 3 - 2 + 4 = 5$$

NB_3 به عنوان با ارزش ترین همسایگی انتخاب خواهد شد و از آنجایی که ارزش مثبت دارد بایستی با توجه به تابع

استخراج و عدم استخراج ارزش نهایی جهت افزودن به SEV به صورت زیر محاسبه شود:

$$\text{ارزش نهایی همسایگی (۱)} = FF_5 \times BEV_5 + FF_6 \times BEV_6 + FF_7 \times BEV_7 = 1 \times 3 + 1 \times (-2) + 1 \times 4 = 5$$

بلوک ۶:

بلوک ۶ دارای ارزش اقتصادی منفی می باشد و همچنین به دلیل قرار گرفتن در یک همسایگی دارای ارزش

اقتصادی مثبت مقدار تابع استخراج این بلوک برابر با ۱ خواهد بود.

$$F_6 = 1, \text{ ارزش بلوک ۶} = -2$$

بلوک ۷:

بلوک ۷ دارای ارزش اقتصادی مثبت بوده اما به دلیل اینکه جز با ارزش ترین همسایگی با مقدار مثبت بوده تابع

استخراج این بلوک برابر با ۱ می باشد و بررسی نخواهد شد.

$$F_7 = 1, \text{ ارزش بلوک ۷} = 1$$

بلوک ۸:

بلوک ۸ ارزش غیر منفی داشته و جزو هیچ همسایگی قرار نگرفته و مقدار تابع استخراج آن برابر با صفر می باشد.

همسایگی های محتمل این بلوک به صورت زیر می باشد:

$$F_8 = 0, \text{ مثبت} = \text{ارزش بلوک ۸}$$

$$NB_1 = \{0, -1, 2\} \implies NBV_1 = 0 - 1 + 2 = 1$$

$$NB_2 = \{4, 0, -1\} \implies NBV_2 = 4 + 0 - 1 = 3$$

$$NB_3 = \{-2, 4, 0\} \implies NBV_3 = -2 + 4 + 0 = 2$$

NB_2 به عنوان با ارزش ترین همسایگی انتخاب خواهد شد و از آنجایی که ارزش مثبت دارد بایستی با توجه به تابع

استخراج و عدم استخراج ارزش نهایی جهت افزودن به SEV به صورت زیر محاسبه شود:

$$\text{ارزش نهایی همسایگی (۲)} = FF_7 \times BEV_7 + FF_8 \times BEV_8 + FF_9 \times BEV_9 = 4 \times 0 + 0 \times 1 + (-1) \times 1 = -1$$

به دلیل اینکه ارزش نهایی این همسایگی منفی می باشد بایستی کنار گذاشته شود.

بلوک ۹:

این بلوک جز هیچ همسایگی نبوده و دارای تابع استخراج با ارزش صفر بوده اما به دلیل داشتن ارزش منفی بررسی نخواهد شد.

$$F_9 = 0, \text{ ارزش بلوک ۹} = -1$$

بلوک ۱۰:

بلوک شماره ۱۰ ارزش اقتصادی مثبتی داشته و همچنین به دلیل قرار نگرفتن در هیچ همسایگی با ارزشی مقدار تابع استخراجش برابر با صفر می باشد و بایستی همسایگی های محتمل این بلوک شناسایی شود.

$$F_{10} = 0, \text{ ارزش بلوک ۱۰} = 2$$

$$NB_1 = \{0, -1, 2\} \implies NBV_1 = 0 - 1 + 2 = 1$$

$$\text{ارزش نهایی همسایگی (۳)} = FF_8 \times BEV_8 + FF_9 \times BEV_9 + FF_{10} \times BEV_{10} = 0 \times 1 + (-1) \times 1 + 2 \times 1 = 1$$

ارزش نهایی همسایگی (۳) مثبت می باشد پس به SEV اضافه خواهد شد.

با به پایان رسیدن بررسی بلوک به بلوک کل مدل بلوکی مجموع ارزش نهایی همسایگی ها تحت عنوان

SEV معرفی و محدوده نهایی به صورت شکل ۲-۴ خواهد شد. در این مثال SEV یا ارزش محدوده نهایی به

صورت زیر است:

$$SEV = 5 + 1 = 6 = \text{ارزش نهایی همسایگی (۳)} + \text{ارزش نهایی همسایگی (۱)}$$

-3	1	0	-4	3	-2	4	0	-1	2
----	---	---	----	---	----	---	---	----	---

شکل ۲-۳: جواب نهایی مدل یک بعدی

ه- الگوریتم شاخه و حد^۱

الگوریتم شاخه و حد، توسط اوانیک و یانگ^۲ در فاصله سال‌های ۱۹۹۵ تا ۱۹۹۹ معرفی شد. در این الگوریتم، محدوده نهایی به روش جست‌وجوی اولین و آخرین نقاط هر ردیف از بلوک‌های موردنظر تعیین می‌شود. برای ساده‌سازی در نظر گرفتن محدودیت‌هایی مانند طول کارگاه و تداوم کارگاه‌ها و مشخص کردن اولین و آخرین نقاط، روشی بر اساس برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط به نام مجموعه مرتب ویژه نوع ۲ (SOS2)^۳ برای تعیین محدوده معدنکاری ارائه شد. این مجموعه، مجموعه‌ای از اعداد است که حداکثر دوتای آن‌ها می‌توانند غیر صفر باشند و اگر دو متغیر غیر صفر وجود داشته باشند این دو متغیر کنار هم خواهند بود. این الگوریتم فقط برای مدل‌های دوبعدی کارایی داشته و بعضی از محدودیت‌ها از جمله شیب دیواره‌ها را نیز در نظر نگرفته است. همچنین، با بزرگ شدن مسئله مدت‌زمان حل مسئله به روش برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط بسیار بالا خواهد رفت (میرزائیان و عطایی‌پور، ۱۳۹۰ و Ovanic & Young, 1995).

و- الگوریتم شناورسازی کارگاه‌های متعدد^۴

الگوریتم دیگری توسط کاورس^۵ در سال ۲۰۰۱ تحت عنوان فرایند شناورسازی کارگاه‌های متعدد (MPFSP) برای گسترش و بهبود عملکرد بسته نرم‌افزار Datamine ارائه داده شد. داده‌های ورودی از قبیل عیارهای بالا، عیار حد و حداکثر مقدار باطله برداری به‌وسیله کاربر وارد می‌شود. مجموعه‌ای از کارگاه‌ها برای هر یک از پارامترهای ورودی تشکیل شده و در فایل در نظر گرفته شده ذخیره می‌شوند. سرانجام، فایل‌های داده‌ای

۱. Branch and Bound Algorithm

۲. Ovanic & Young

۳. Special Ordered Sets of Type 2

۴. Multiple Pass Floating Stope Process Algorithm

۵. Cawrse

و آماری که در طول فرایند تولید شده‌اند با فرمت Csv در محیط Excel ذخیره می‌شوند. این فرایند، پیش از تولید کارگاه مورد نظر و برای شناور بودن کل پارامترها را ارزیابی می‌کند. هرچند که این فرایند به تسهیل انتخاب شدن محدوده معدنکاری زیرزمینی نسبت به الگوریتم کارگاه شناور کمک بسزایی کرده است، اما محدوده بهینه واقعی را به دست نمی‌آورد (Cawres, 2001).

ز- الگوریتم برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط^۱

گریکو و دیمیتروکاپولوس^۲ در سال ۲۰۰۷ الگوریتم احتمالاتی مبتنی بر برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط را ارائه کردند. در این الگوریتم، ابتدا توده ماده معدنی به چندلایه تقسیم می‌شود که هر لایه نیز به چندین پهنه و همچنین هر پهنه نیز خود به چند حلقه تقسیم می‌شود. هر حلقه به‌عنوان یک متغیر صفر و یک در مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط در نظر گرفته خواهد شد. تابع هدف مدل، ماکزیمم‌سازی محتوای فلز در بازه زمانی مشخص می‌باشد. کمترین و بیشترین مقدار حلقه‌های معدنی و اندازه پایه‌های معدنی که باید بین دو کارگاه باقی گذاشته شود، به‌وسیله محدودیت‌های مدل اعمال شده‌اند. این فرایند، عدم قطعیت زمین‌شناسی را در حین طراحی کارگاه‌ها در نظر می‌گیرد. این روش، محدوده بهینه را بر اساس حلقه‌ها و موقعیت و اندازه کارگاه‌ها تعیین می‌کند. علاوه بر این، عملکرد الگوریتم، به تعداد متغیرهای صفر و یک در مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط وابسته است. با افزایش تعداد حلقه‌ها، مدت‌زمان حل مسئله به صورت نمایی افزایش خواهد یافت (Grieco & Dimitrakopoulos, 2007 & 2009).

۱. Mixed-integer programming Algorithm

۲. Dimitrakopoulos & Grieco

ح- الگوریتم سنس و توپال^۱

توپال و سنس در سال ۲۰۱۰ یک الگوریتم ابتکاری برای تعیین محدوده بهینه معادن زیرزمینی ارائه دادند. این الگوریتم ابتکاری بر اساس ارزش اقتصادی کارگاه‌ها در نرم‌افزار Matlab پیاده‌سازی شد. این روش بر روی مدل بلوکی اقتصادی قابل اجرا بوده و قادر به یافتن، موقعیت، ارزش و سود خالص فعلی کارگاه‌های زیرزمینی در فضای سه بعدی است. در این الگوریتم برای یافتن محدوده نهایی بایستی مدل بلوکی دارای بلوک‌های همسان بوده به همین منظور به وسیله یک مبدل مدل بلوکی دارای بلوک‌های با ابعاد متفاوت را به مدل بلوکی به بلوک‌های هم اندازه تبدیل می‌کند.

این فرایند بدین صورت است که کل حجم بلوک یا بخشی از حجم آن در بلوک جدید قرار می‌گیرد و سپس مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای محاسبه ارزش بلوک‌ها در مدل بلوکی جدید ابتدا ارزش بلوک‌هایی که درون بلوک جدید هستند در حجمی از این بلوک‌ها که درون بلوک جدید قرار می‌گیرد، ضرب خواهد شد. در نهایت کل این مقادیر جمع می‌شوند و بر کل حجم بلوک جدید تقسیم می‌شود. پس ارزش بلوک جدید بدین شکل محاسبه می‌شود و این روند برای کل بلوک‌های مدل اقتصادی اجرا خواهد شد (Sens and Topal, 2008 & 2010). در گام بعد الگوریتم بایستی پارامترهایی نظیر قیمت هر تن ماده معدنی، هزینه استخراج و فرآوری هر تن از مواد استخراج شده و ... را وارد کرده و سپس الگوریتم طی چهار مرحله عملیات بهینه‌سازی انجام می‌دهد:

- مرحله ۱: ابتدا از کمترین ابعاد ممکن کارگاه شروع کرده و تمام موقعیت‌های ممکن برای کارگاه‌های با این ابعاد، در مدل بلوکی مشخص می‌شود. سپس موقعیت و ارزش کارگاه‌های دارای ارزش مثبت به صورت نزولی از بالا به پایین در یک جدول نوشته می‌شود. این روند تا رسیدن به بزرگ‌ترین ابعاد ممکن

۱. Sens & Topal Algorithm

کارگاه ادامه پیدا می‌کند در نهایت جدولی شامل موقعیت و ارزش تمام کارگاه‌های محتمل تشکیل می‌شود.

- مرحله ۲: در این مرحله یک پوش بر روی هر کارگاه قرار گرفته و ارزش تمام کارگاه‌هایی که درون این پوش قرار گرفته‌اند را با هم جمع کرده سپس بر تعداد کارگاه‌هایی که درون پوش قرار گرفته تقسیم می‌شود. مقدار میانگین برای هر کارگاه محتمل به جدول حاصله از مرحله قبل اضافه خواهد شد.

- مرحله ۳: در این مرحله ابتدا کارگاه استخراجی که در جدول مذکور دارای بیشترین ارزش بوده انتخاب می‌شود و اگر این کارگاه دارای بیشترین میانگین باشد بلوک‌های درون کارگاه را جز محدوده اصلی قرار داده و کارگاه‌های دارای بلوک مشترک با کارگاه انتخابی کنار گذاشته می‌شود.

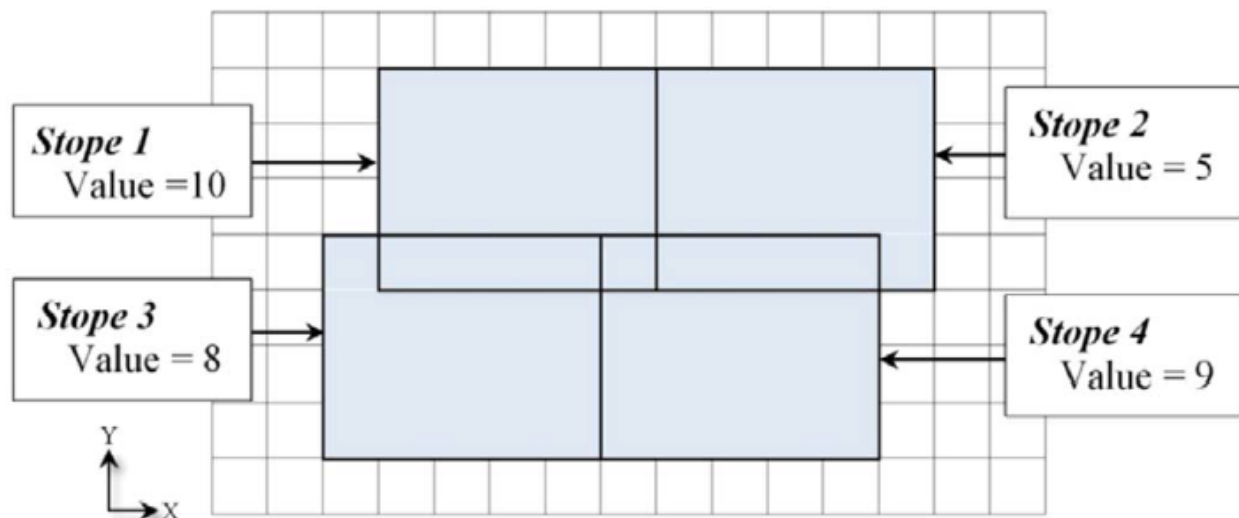
- مرحله ۴: در این مرحله برای ادامه‌ی روند الگوریتم و یافتن کارگاه با ارزش بعدی بایستی مرحله ۳ مجدداً تکرار شود و تا زمانی که تمام کارگاه‌ها از جدول کارگاه‌های محتمل حذف شوند بررسی ادامه می‌یابد.

پس از اجرای این چهار مرحله، جدول نهایی به وجود خواهد آمد که شامل کارگاه‌هایی که هیچ‌گونه همپوشانی با هم نداشته و از با ارزشترین به سمت ارزش کمتر مرتب شده است. انتخاب کارگاه‌ها بر اساس میانگین سود پوش‌ها ضمانت می‌کند که هم بهترین چیدمان انتخاب شده و هم پوش‌ها دارای ابعاد مجاز می‌باشند.

این الگوریتم دارای توانایی‌های زیر می‌باشد (Nhleko et al, 2017):

- تعیین محدوده بهینه با استفاده از ابعاد متفاوت کارگاه استخراج.
- تعیین محدوده بهینه بر اساس یک ابعاد مشخصی از کارگاه استخراجی.
- یافتن اندازه بهینه کارگاه استخراجی و مشخص کردن محدوده نهایی بر اساس این ابعاد.
- اولویت انتخاب کارگاه‌هایی که ارزش آنها تقسیم بر حجم آنها بیشتر از سایر کارگاه‌ها باشد.

بزرگ‌ترین مزیت الگوریتم سنس و توپال این است که توانایی ایجاد کارگاه را در سه بعد دارا است. کارگاه‌هایی که عضو محدوده نهایی قرار دارند از مجموعه کارگاه‌های دارای ارزش اقتصادی مثبت که به صورت نزولی مرتب شده با توجه به غیر همپوشان بودن انتخاب خواهند شد. به عنوان مثال در مثال زیر که از ۵ بلوک در راستای X و چهار بلوک در راستای Y تشکیل شده طبق روند الگوریتم کارگاه شماره ۱ به دلیل داشتن بیشترین ارزش اقتصادی به عنوان اولین عضو محدوده نهایی انتخاب خواهد شد. پس از انتخاب کارگاه ۱ دیگر کارگاه‌ها از لحاظ همپوشانی با کارگاه شماره ۱ بررسی خواهند شد. پس از بررسی کارگاه شماره ۲ به دلیل نداشتن همپوشانی با کارگاه شماره ۱ جز محدوده نهایی قرار خواهد گرفت اما کارگاه‌های ۳ و ۴ به دلیل همپوشانی با کارگاه شماره ۱ نادیده گرفته خواهند شد. در صورتی که کارگاه‌های ۳ و ۴ ارزش اقتصادی بیشتری نسبت به کارگاه‌های ۱ و ۲ دارند بدین صورت که ارزش محدوده نهایی که توسط الگوریتم ارائه شده برابر است با ۱۵ اما مجموع ارزش کارگاه‌های ۳ و ۴ برابر با ۱۷ است. پس این الگوریتم برای تولید با ارزش‌ترین چیدمان کارگاه ناموفق عمل می‌کند (Nhleko et al, 2017).



شکل ۲-۴: همپوشانی کارگاه‌های احتمالی (Sandanayake, 2014)

ط- الگوریتم شبکه جریان^۱

بای و همکاران^۲ در سال ۲۰۱۳ تئوری گراف و الگوریتم شبکه جریان را برای بهینه‌سازی محدوده معدنکاری زیرزمینی ارائه کردند. این روش، صرفاً برای معادن زیرزمینی که به روش استخراج از طبقات فرعی انجام می‌شوند استفاده می‌شود. در مدلسازی این روش به جای استفاده از مدل بلوکی مرسوم، از یک مدل بلوکی استوانه‌ای استفاده شده است. در این الگوریتم، ابتدا یک سیستم مختصات استوانه‌ای در اطراف یک دوپل و یک موقعیت ابتدایی به منظور آماده‌سازی دوپل در نظر گرفته خواهد شد و همچنین محدودیت‌های ژئوتکنیکی در کمربالا و کمرپایین به عنوان روابط تقدم بین بلوک‌ها در سیستم مختصات استوانه‌ای دیکته خواهند شد. در گراف موردنظر از کمان‌های عمودی برای محدودیت کمرپایین و کمربالا و کمان افقی برای لحاظ کردن محدودیت عرض کارگاه استفاده شده است. عملکرد روش ذکرشده با الگوریتم کارگاه شناور مورد مقایسه قرار گرفته است و نشان داده شده است که این روش نتایج بهتری را تولید می‌کند، هرچند که این روش فقط برای روش استخراج از طبقات فرعی مورد استفاده قرار می‌گیرد (Bai et al, 2013).

ی- الگوریتم الیپس^۳

الگوریتم الیپس توسط جلالی (جلالی، ۱۳۸۵) ارائه شد. وی الگوریتم جزگرای الیپس را با شبیه‌سازی مشخصات فنی و هندسی کارگاه‌های استخراج توسعه دادند. الگوریتم الیپس بر روی نوع ویژه‌ای از مدل اقتصادی کارگاه استخراج تعریف می‌شود که در این مدل، بعضی از محدودیت‌های فنی و هندسی روش‌های استخراج زیرزمینی حذف شده است. این الگوریتم بر روی مدل‌های اقتصادی دوبعدی در یک طبقه یا پهنه کاربرد دارد و همچنین این الگوریتم به منظور بهینه‌سازی کانسارهای رگه‌ای بکار می‌روند و این روش بر اساس و منطق

۱. Network Flow Method

۲. Bai et al;

۳. Optimum Limit Integrated Probable Stope (OLIPS)

برنامه‌ریزی پویا می‌باشد. بدین صورت که پس از ساختن مدل بلوکی اقتصادی از روی مدل بلوکی عیاری، محدودیت‌های ابعادی کارگاه‌های زیرزمینی مشخص شده و سپس مدل کارگاه محتمل و مدل کارگاه محتمل یکپارچه که الگوریتم الیپس بر روی آن اجرا می‌شود، تولید می‌شود. همچنین جلالی الگوریتم^۱ GOUMA را به‌منظور رفع کمبود الگوریتم الیپس در حین تغییرات تعداد و ارتفاع طبقات ارائه کرد. سرانجام، یک برنامه کامپیوتری با عنوان GOUMA-CP توسط جلالی و همکاران توسعه داده شد (جلالی و همکاران، ۱۳۹۵).

ک- الگوریتم حریصانه^۲

جلالی و حسینی در سال ۱۳۸۸ الگوریتمی تحت عنوان الگوریتم حریصانه را برای مشخص نمودن محدوده بهینه استخراج معادن زیرزمینی معرفی کردند. این الگوریتم از منطق جست‌وجوگری تبعیت می‌کند و بر روی مدل گرافی متناظر با مدل بلوکی اقتصادی اجرا و با کاربرد روش دیکسترا که یکی از بهترین روش‌های حل الگوریتم حریصانه است، محدوده بهینه نهایی را جست‌وجو می‌کند. به این شکل که جست‌وجوی طولانی‌ترین مسیر بر روی گراف موردنظر به صورت یک فرآیند برگشتی محدوده نهایی را مشخص می‌کند. این الگوریتم فقط برای مدل‌های دوبعدی کاربرد دارد و نتایج قابل قبولی را ارائه می‌دهد (Jalali & Hosseini, 2009).

ل- الگوریتم جزگرا^۳ SOA

نیک‌بین در ۲۰۱۲ تحقیقی تحت عنوان "بهینه‌سازی محدوده معدنکاری زیرزمینی برای روش‌های تخریب در طبقات فرعی و استخراج از طبقات فرعی" انجام داد. در آن تحقیق، به‌منظور تعیین محدوده بهینه

۱. Global Optimization for Underground Mining Area (GOUMA)

۲. Greedy Algorithm

۳. Stope Optimiser Algorithm

کارگاه‌های استخراج، یک الگوریتم جزگرای جدید به نام SOA طراحی شده است که در یک طبقه استخراجی با در نظر گرفتن محدودیت‌های فنی تعریف شده، محدوده بهینه را تعیین می‌کند. این الگوریتم توانایی در نظر گرفتن محدودیت‌هایی مانند حداقل و حداکثر طول کارگاه استخراج در دو جهت امتداد و ضخامت، حداقل و حداکثر ارتفاع کارگاه‌های استخراج، محدودیت هم تراز و همچنین حداقل عرض لنگه جانبی را دارا است. پس از تدوین این الگوریتم، برای فراگیر نمودن عملیات طراحی، الگوریتم دیگری به نام MLOA^۱ توسط جلالی و همکاران تدوین و توسعه داده شده است. در این الگوریتم ابتدا تعداد و محل تمام طبقات محتمل، مشخص و سپس با فراخوانی الگوریتم SOA، تعداد، ابعاد و موقعیت کارگاه‌های استخراج در درون هر طبقه استخراجی مشخص می‌گردد. در نهایت با تعیین ارزش به دست آمده از مجموع ارزش طبقات محتمل و تعیین ارزش هر محدوده معدن کاری محتمل، این محدوده‌ها با یکدیگر مقایسه شده و یک چیدمان بهینه از تعداد و جانمایی طبقات، به همراه تعیین محدوده‌ی استخراج در هر طبقه استخراجی به عنوان خروجی الگوریتم MLOA انتخاب خواهد شد. یک برنامه کامپیوتری نیز در محیط نرم‌افزار Matlab تدوین شده است که با کاربرد آن، پس از وارد نمودن مدل بلوکی زمین‌شناسی و پارامترهای فنی و اقتصادی، بر مبنای الگوریتم فراگیر MLOA، محدوده بهینه معدن کاری تعیین می‌شود و در نهایت یک تصویر سه‌بعدی از محدوده بهینه کارگاه‌ها و طبقات استخراجی به عنوان خروجی این برنامه نشان داده است (نیک‌بین، ۱۳۹۱).

م- الگوریتم ساندانیک و همکاران^۲

ساندانیک و همکاران در سال ۲۰۱۵ با استفاده از یک الگوریتم ابتکاری مبتنی بر تولید کارگاه‌های محتمل و تولید مجموعه‌های کارگاه‌های غیر همپوشان الگوریتمی برای تعیین محدوده بهینه معدنکاری زیرزمینی توسعه

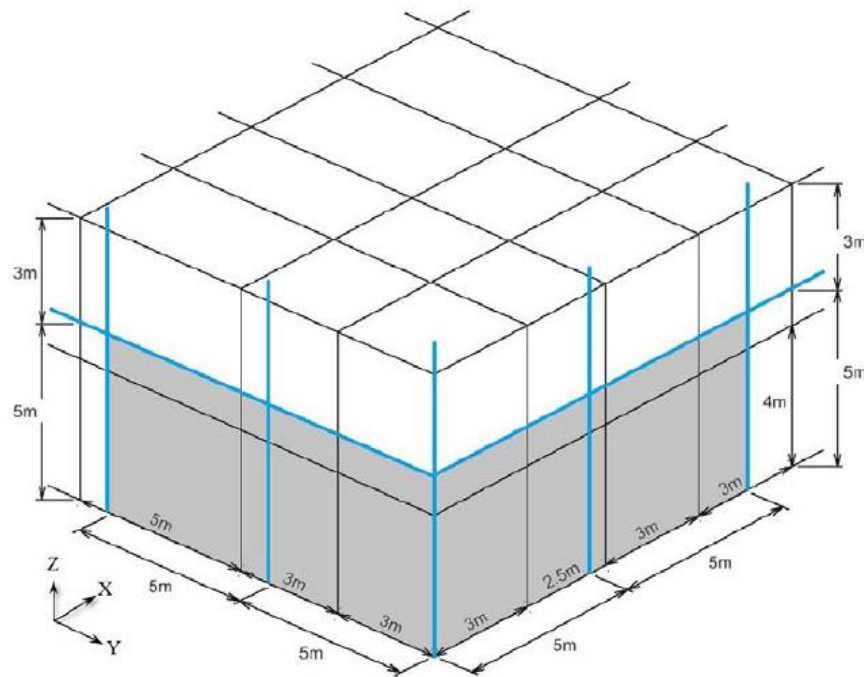
۱. Mining Limit Optimiser Algorithm

۲. Sandanayake et al Algorithm

دادند. این الگوریتم عملاً بهبودی از الگوریتم سنس و توپال بوده و طی چهار مرحله جواب نهایی را به دست می‌آورد که عبارت‌اند از: یکسان سازی بلوک‌های مدل بلوکی عیاری، تهیه مدل بلوکی اقتصادی، تولید تمامی کارگاه‌های محتمل زیرزمینی، تولید مجموعه کارگاه‌های غیرهمپوشان و انتخاب مجموعه‌ای با بیشترین ارزش اقتصادی (Sandanayake et al, 2015a & 2015b).

۱- تهیه مدل بلوکی عیاری با بلوک‌های یکسان

این الگوریتم بر روی مدل بلوکی منظم یعنی مدل بلوکی دارای بلوک‌های هم اندازه و یکسان قابل اجرا می‌باشد. در صورتی که مدل بلوکی دارای بلوک‌هایی با ابعاد متفاوت باشد در این مرحله ابعاد (طول، عرض و ارتفاع) مدل بلوکی همسان‌سازی شده تعریف می‌شود. بدین شکل حداقل مشخصات بین مجموعه مشخصات برای بلوک‌های اصلی به حداقل مشخصات مدل بلوکی منظم تبدیل می‌شود. به همین ترتیب حداکثر مشخصات در مدل بلوکی اولیه را به عنوان بزرگ‌ترین مشخصات برای بلوک‌های درون مدل بلوکی همسان شده در نظر گرفته خواهد شد. پس از تعریف ابعاد جدید و این دو محدودیت مدل بلوکی با بلوک‌های دارای ابعاد متفاوت به مدل بلوکی دارای بلوک‌های یکسان تبدیل خواهد شد و همچنین مشخصاتی نظیر عیار، چگالی، وزن، و ارزش اقتصادی را به روزرسانی خواهد شد در شکل ۲-۶ مثالی از این فرایند را نشان داده شده است (Sandanayake et al, 2015a).



شکل ۲-۵: تبدیل مدل بلوکی با ابعاد بلوک متفاوت به مدل بلوکی با ابعاد یکسان (Sandanayake et al, 2015a)

این مدل فرضی از بلوک‌هایی با ابعاد متفاوت ($4 \times 3 \times 3$ متر، $4 \times 3 \times 2/5$ متر، $4 \times 5 \times 3$ متر، و $4 \times 5 \times 4$ متر) تشکیل شده است. در این شرایط یکسان‌ساز با استفاده از بلوک‌های اصلی برای به دست آوردن بلوک‌های جدید با اندازه ثابت $5 \times 5 \times 5$ استفاده می‌کند. در این شکل خطوط آبی محدودیت‌های ابعاد بلوک‌های جدید و همچنین ناحیه رنگی بلوک‌های هم اندازه می‌باشند. همان‌طور که از شکل پیدا است ممکن است بخشی یا کل بلوک اصلی در بلوک جدید قرار بگیرد (Sandanayake et al, 2015a).

۲-تهیه مدل بلوکی اقتصادی

در مرحله بعد مدل عیاری ساخته شده در مرحله پیش با استفاده از پارامترهای اقتصادی و با توجه به عیار حد ماده معدنی بدین شکل که اگر عیار بلوکی از عیار حد کمتر باشد طبق رابطه ۲-۶ و در غیر این صورت با استفاده از رابطه ۲-۷ مدل بلوکی اقتصادی محاسبه می‌شود (Sandanayake et al, 2015a).

$$BEV = -C_m \times T$$

۶-۲

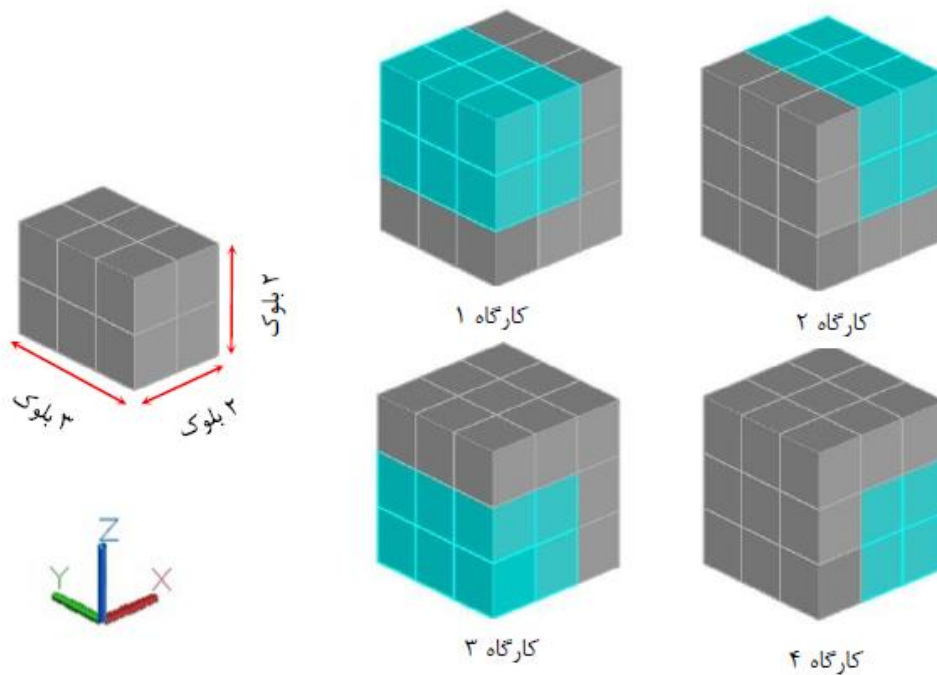
$$BEV = \{(P - R) \times g \times Y - (C_m - C_p)\} \times T$$

۷-۲

در رابطه مذکور P قیمت (دلار بر تن فلز)، C_m هزینه‌های معدنکاری (دلار بر تن ماده معدنی)، C_p هزینه‌های فرآوری (دلار بر تن ماده معدنی)، R هزینه ذوب و تصفیه (دلار بر تن فلز)، Y راندمان (%)، BEV ارزش اقتصادی بلوک (دلار)، g عیار ماده معدنی، T تناژ بلوک (تن) می‌باشد.

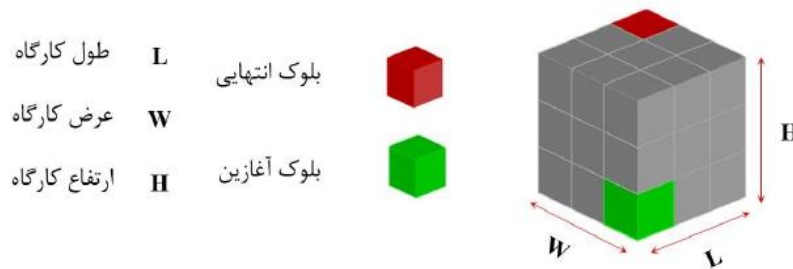
۳-تولید کارگاه‌های محتمل زیرزمینی

در این مرحله یک کارگاه استخراج زیرزمینی متشکل از مجموعه‌ای از بلوک‌ها در سه راستا یعنی راستای X, Y, Z به شکل مکعب مستطیل در نظر گرفته می‌شود. پس از تعریف کارگاه استخراجی این کارگاه در مدل بلوکی شروع به حرکت کرده و تمام حالت ممکن برای کارگاه استخراجی را می‌یابد. مطابق شکل ۶-۲ که یک مدل بلوکی متشکل از ۲۷ بلوک (۳ بلوک در هر راستا) است و همچنین کارگاه استخراجی تعریف شده متشکل از ۲ بلوک در راستای X ، ۳ بلوک در راستای Y و ۲ بلوک در راستای Z می‌باشد. طبق این شرایط در صورت شناور شدن کارگاه در مدل بلوکی ۴ کارگاه محتمل تولید خواهد شد. برای درک بهتر در این الگوریتم برای هر بلوک از مشخصه‌ی (i, j, k) استفاده شده که با استفاده از این مشخصه بلوک‌ها از یکدیگر متمایز خواهند شد (Sandanayake et al, 2015a).



شکل ۲-۶: چهار کارگاه احتمالی با ابعاد $2 \times 3 \times 2$ در مدل بلوکی $3 \times 3 \times 3$ (ستوده، ۱۳۹۶)

طی این فرآیند ارزش هر کارگاه مشابه الگوریتم سنس و توپال برابر با مجموع ارزش بلوک‌های قرار گرفته در کارگاه مورد نظر می‌باشد. برای محاسبه ارزش هر کارگاه بایستی بلوک‌هایی که درون کارگاه قرار گرفته‌اند شناسایی شود. بدین منظور دو مفهوم بلوک آغازین که با (i', j', k') و بلوک انتهایی (i'', j'', k'') تعریف می‌شود شکل (۷-۲) و همچنین برای نشان دادن بلوک انتهایی مدل بلوکی از مشخصه $(i_{\max}, j_{\max}, k_{\max})$ استفاده می‌شود.



شکل ۲-۷: مشخصات کارگاه استخراجی (ستوده، ۱۳۹۶)

با مشخص کردن ابعاد هر کارگاه می‌توان بلوک انتهایی مربوط به هر کارگاه را نیز با استفاده از رابطه

۸-۲ شناسایی کرد.

$$i'' = i' + (nx_s - 1)$$

$$j'' = j' + (nx_s - 1) \quad ۸-۲$$

$$k'' = k' + (nx_s - 1)$$

در رابطه مذکور تعداد بلوک‌های کارگاه در سه راستای x ، y و z برابر با nx_s ، ny_s و nz_s می‌باشد. بر اساس این الگوریتم همه‌ی کارگاه‌های احتمالی که در رابطه ۸-۲ صدق می‌کنند تولید خواهد شد.

$$(i', j', k') \leq (i, j, k) \leq (i'', j'', k'')$$

$$(i'' \leq i_{max}, j'' \leq j_{max}, k'' \leq k_{max}) \quad ۹-۲$$

پس از تولید کارگاه‌های محتمل عیار متوسط و ارزش هر کارگاه محاسبه خواهد شد. بدین شکل که عیار متوسط هر کارگاه برابر است با میانگین عیار بلوک‌های در برگرفته شده و همانطور که گفته شد ارزش هر کارگاه برابر با مجموع ارزش بلوک‌های درون کارگاه می‌باشد. پس از محاسبه‌ی ارزش و عیار متوسط کارگاه‌های محتمل کارگاه‌هایی که دارای ارزش غیر مثبت بوده کنار گذاشته و مابقی کارگاه‌ها به مرحله بعد خواهند رفت (Sandanayake, 2014).

۴-تولید مجموعه‌های غیر همپوشان

در این الگوریتم تلاش بسیاری برای تولید و کنار هم قرار دادن مجموعه‌ای از کارگاه‌های دارای ارزش مثبت است. پس از کنار گذاشتن کارگاه‌های با ارزش غیر مثبت و طی مراحل زیر مجموعه‌ای از کارگاه‌های همپوشان تولید می‌شود. بدین منظور مجموعه F_k که اعضای آن مجموعه‌ای از کارگاه‌های غیرهمپوشان است در نظر گرفته

می‌شود. مجموعه F_u هم‌عضوی از مجموعه F_k است که با ارزش‌ترین مجموعه‌ی کارگاه‌های غیرهمپوشان می‌باشد. مراحل این الگوریتم به صورت زیر می‌باشد (Sandanayake, 2014):

- (۱) وارد کردن اطلاعات مربوط به کارگاه‌های احتمالی با ارزش اقتصادی مثبت
 - (۲) تولید دو مجموعه تهی F_u و F_k و تکرار مراحل ۳ تا ۸ برای هر کارگاه محتمل
 - (۳) تکرار مراحل ۴ تا ۸ به ازای هر V_k عضو مجموعه F_k
 - (۴) تولید مجموعه تهی T_k
 - (۵) تولید مجموعه تهی V_k' و افزودن کارگاه S به آن و ترکیب مجموعه‌های V_k' و V_k'' به شرطی که کارگاه‌ها با یکدیگر همپوشانی نداشته باشند.
 - (۶) تولید مجموعه تهی V_k'' و افزودن کارگاه S به آن
 - (۷) افزودن تمامی مجموعه‌های V_k ، V_k' و V_k'' به مجموعه T_k
 - (۸) افزودن مجموعه T_k به مجموعه F_u
 - (۹) انتخاب مجموعه‌ای از کارگاه‌ها از مجموعه F_k با بیشترین ارزش اقتصادی به عنوان محدوده بهینه
- طی مراحل ذکر شده الگوریتم با ارزش‌ترین مجموعه کارگاه‌های غیر هم‌پوشان را تولید می‌کند. عمده ترین مشکل این الگوریتم زمان حل و بدست آوردن محدوده نهایی است بدین صورت که با بزرگ شدن مسئله کارگاه‌های محتمل بیشتری تولید خواهد شد در نتیجه برای تولید و انتخاب با ارزش‌ترین مجموعه کارگاه‌های غیر همپوشان زمان حل مسئله به صورت نمایی بالا می‌رود (Sandanayake et al, 2015a & 2015b).
- الگوریتم ساندانیک و همکاران علاوه بر زمان‌بر بودن محاسبه محدوده نهایی، تعدادی زیادی از بلوک و کارگاه‌های دارای ارزش اقتصادی مثبت را به علت همپوشانی با سایر کارگاه‌های استخراجی که دارای ارزش اقتصادی بیشتری بوده، در نظر نمی‌گیرد. این در صورت است که می‌توان با در نظر گرفتن این بلوک‌ها سودآوری بیشتری حاصل گردد. در شکل ۲-۸ مشاهده می‌شود که کارگاه‌های ۱، ۵ و ۹ دارای ارزش اقتصادی مثبت

می‌باشند اما الگوریتم ساندانیک با توجه به همپوشانی کارگاه‌های محتمل مثبت فقط کارگاه شماره ۱ به عنوان محدوده نهایی انتخاب خواهد شد.

در نهایت الگوریتم ساندانیک و همکاران پس از حل مسئله برای نمایش محدوده نهایی نیاز به استفاده از برنامه کامپیوتری مستقل دیگر دارد که بتواند نتایج را به صورت گرافیکی نمایش دهد.

-20	-20	2	1	3
-10	1	5	2	2
5	2	4	-1	-2
1	-5	3	4	-50
2	3	2	-60	60

کارگاه ۷

-20	-20	2	1	3
-10	1	5	2	2
5	2	4	-1	-2
1	-5	3	4	-50
2	3	2	-60	60

کارگاه ۸

-20	-20	2	1	3
-10	1	5	2	2
5	2	4	-1	-2
1	-5	3	4	-50
2	3	2	-60	60

کارگاه ۹

-20	-20	2	1	3
-20	1	5	2	2
5	2	4	-1	-2
1	-5	3	4	-50
2	3	2	-60	60

کارگاه ۴

-20	-20	2	1	3
-10	1	5	2	2
5	2	4	-1	-2
1	-5	3	4	-50
2	3	2	-60	60

کارگاه ۵

-20	-20	2	1	3
-10	1	5	2	2
5	2	4	-1	-2
1	-5	3	4	-50
2	3	2	-60	60

کارگاه ۶

-20	-20	2	1	3
-10	1	5	2	2
5	2	4	-1	-2
1	-5	3	4	-50
2	3	2	-60	60

کارگاه ۱

-20	-20	2	1	3
-10	1	5	2	2
5	2	4	-1	-2
1	-5	3	4	-50
2	3	2	-60	60

کارگاه ۲

-20	-20	2	1	3
-10	1	5	2	2
5	2	4	-1	-2
1	-5	3	4	-50
2	3	2	-60	60

کارگاه ۳

شکل ۲-۸: کارگاه‌های دارای ارزش اقتصادی مثبت

ن- الگوریتم نیک‌بین و همکاران

نیک‌بین و همکاران در ۲۰۱۸ تحقیقی تحت عنوان "بهینه‌سازی مرز کارگاه: یک مدل ریاضی و ابتکاری

کارآمد" انجام دادند. در آن تحقیق یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح (IP) برای حل مسئله بهینه‌سازی مرز کارگاه

(SBO)^۱ ارائه کردند. دامنه کاربرد این مدل محدود به مسائل غیر پیچیده بود و در نتیجه برای پوشش دادن تمام مسائل بهینه‌سازی مرز کارگاه، یک الگوریتم حریصانه نیز توسعه دادند. الگوریتم حریصانه در سه نمونه واقعی پیاده‌سازی شد و فاصله تا بهینگی آن در این موارد به ترتیب ۱/۸۵٪، ۰/۴۷٪ و ۱/۴۲٪ بود. با این حال برای به دست آوردن نتایج بهتر و کاهش فاصله بهینگی در آن تحقیق یک الگوریتم شمارش تکراری جدید معرفی کردند. الگوریتم پیشنهادی از دو الگوریتم درونی استفاده می‌کند: الگوریتم‌های بهبود یافته حریصانه و برنامه‌ریزی پویا تقریبی؛ فاصله بهینگی الگوریتم شمارش بهینگی در کلیه موارد ذکر شده از ۰/۰۶٪ کمتر بود (Nikbin et al, 2018).

س-الگوریتم ترکیبی تقریبی سه‌بعدی^۲

نیک‌بین و همکاران در ۲۰۱۸ در تحقیقی دیگر تحت عنوان "یک الگوریتم ترکیبی تقریبی سه‌بعدی برای بهینه‌سازی مرز کارگاه" یک الگوریتم ترکیبی جدید معرفی کردند که ترکیبی از برنامه‌ریزی پویا و الگوریتم حریصانه بود. اگرچه این الگوریتم پیشنهادی ممکن است نتواند یک راه‌حل بهینه واقعی ارائه دهد اما می‌تواند راه‌حل‌های بهتری نسبت به الگوریتم‌های موجود تولید کند. الگوریتم پیشنهادی جدید و سه الگوریتم موجود برای یافتن مرزهای کارگاه بر روی یک نمونه واقعی مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی می‌تواند در مقایسه با الگوریتم‌های کارگاه شناور، بارزش‌ترین همسایگی و الگوریتم حریصانه به ترتیب در یک مطالعه موردی واقعی در یک‌زمان مناسب پردازنده سود را ۱۱۷/۷۸٪، ۱۶/۸۶٪ و ۰/۴۲٪ بهبود بخشد (Nikbin et al, 2018).

^۱. Stope boundary optimization

^۲. 3D Approximate Hybrid Algorithm

ع- الگوریتم متامورس و کمرال^۱

متامورس و کمرال در سال ۲۰۱۹ در تحقیقی تحت عنوان "برنامه‌ریزی معدن زیرزمینی: بهینه‌سازی چیدمان کارگاه با عدم قطعیت عیاری با استفاده از الگوریتم‌های ژنتیک" یک مدل بهینه‌سازی تصادفی سه مرحله‌ای با ترکیب الگوریتم ژنتیک (GA) برای محاسبه عدم قطعیت عیار پیشنهاد کردند. مرحله اول عدم قطعیت چیدمان کارگاه را محاسبه می‌کند. مرحله دوم با طراحی میانگین و ارزیابی امکان‌سنجی آن‌ها جمعیت اولیه را ایجاد می‌کند و در نهایت در مرحله سوم از الگوریتم ژنتیک برای بهبود این جمعیت اولیه در طول نسل‌ها استفاده می‌کنند. این رویکرد سود بالاتر، ترقیق پیش‌بینی شده کمتر و یک طرح کارگاه قوی را تولید می‌کند که نسبت به نوسانات عیار ماده معدنی حساسیت ندارد (Matamoros & Kumral, 2019).

۳-۴- جمع‌بندی

با توجه به مفاهیم ذکر شده، مسئله بهینه‌سازی کارگاه‌های استخراجی به دلیل پیچیدگی محاسباتی و بزرگی مسئله می‌توان به عنوان یک مسئله بهینه‌سازی NP-Hard تعریف کرد. بنابراین برای حل این مسئله ممکن است با استفاده از یک الگوریتم ابتکاری که راه‌حل‌های ممکن را جستجو و در عین حال محدودیت‌های استخراجی را در نظر بگیرد. راه‌حل بهینه را پیدا کرد. در فصل سوم الگوریتمی با این خصوصیات پیشنهاد شده است.

^۱. Matamoros & Kumral Algorithm

فصل سوم:

طراحی پیمان کارگاه های استخراجی

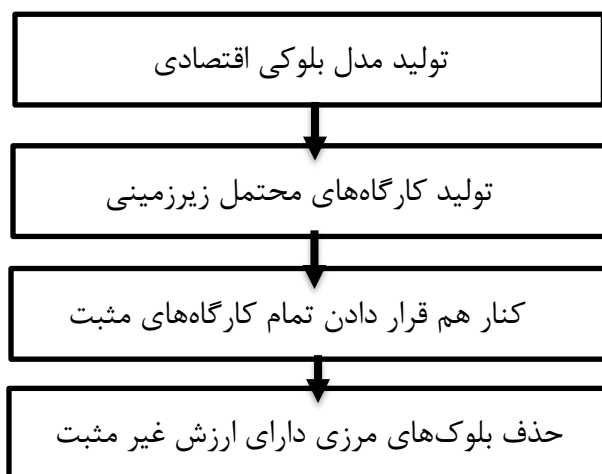
۳-۱- مقدمه

بهینه‌سازی یکی از جنبه‌های کلیدی طراحی و فرایند برنامه‌ریزی در معادن است. الگوریتم‌های مختلفی برای بهینه‌سازی معادن توسعه داده شده است. با این حال، اکثر این الگوریتم‌ها بر روی بهینه‌سازی معادن روباز تمرکز دارند. بهینه‌سازی معادن زیرزمینی در دهه‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است و بر سه حوزه اصلی بهینه‌سازی از جمله بهینه‌سازی محدوده کارگاه متمرکز است. در این فصل ابتدا الگوریتم ارائه شده توضیح داده خواهد شد و همچنین از آنجایی که در این تحقیق الگوریتم ساندانیک هم در محیط زبان برنامه‌نویسی Python کد نویسی شده الگوریتم ارائه شده در این تحقیق علاوه بر مقایسه با استفاده از مثال دوبعدی با مثال سه‌بعدی با الگوریتم ساندانیک مورد مقایسه قرار گرفته است.

۳-۲- الگوریتم SBO3D

در این تحقیق الگوریتمی با نام SBO3D جهت تعیین محدوده نهایی بهینه بر مبنای دو الگوریتم سنس و توپال و الگوریتم ساندانیک و همکاران در محیط زبان برنامه نویسی Python توسعه داده شده است. همان‌طور که در فصل قبل توضیح داده شد الگوریتم سنس و توپال روشی ابتکاری و بر مبنای شناور شدن کارگاه استخراجی و انتخاب بهترین چیدمان کارگاه‌های محتمل می‌باشد. از آنجایی که در الگوریتم سنس و توپال کارگاه‌های دارای

ارزش اقتصادی مثبت به صورت نزولی مرتب شده و پس از انتخاب با ارزش‌ترین کارگاه به عنوان اولین عضو مجموعه محدوده نهایی انتخاب خواهد شد و دیگر کارگاه‌ها با توجه به غیرهمپوشان بودن نسبت به کارگاه‌های انتخاب شده به عنوان اعضای مجموعه محدوده نهایی انتخاب می‌شوند و در نهایت پس از بررسی تمام کارگاه‌های احتمالی دارای ارزش اقتصادی مثبت جواب نهایی تولید خواهد شد. مطابق روند کار این الگوریتم به علت مرتب کردن کارگاه‌های دارای ارزش اقتصادی مثبت به صورت نزولی و انتخاب با ارزش‌ترین کارگاه و دیگر کارگاه‌های دارای ارزش اقتصادی مثبت که با دیگر کارگاه‌های انتخاب شده همپوشانی ندارند باعث خواهد شد دیگر چیدمان‌ها که ممکن است سودآوری بیشتری داشته باشند در نظر گرفته نشوند پس در نتیجه این الگوریتم توانایی تولید جواب نهایی بهینه را نخواهد داشت. در همین راستا ساندانیک و همکاران الگوریتم سنس و توپال را بهبود بخشیده و موفق به دستیابی به با ارزش‌ترین توالی کارگاه‌های استخراجی شدند. الگوریتم ارائه داده شده در این تحقیق با هدف بهبود الگوریتم ساندانیک و همکاران موفق به تولید چیدمان کارگاه‌های استخراجی بهتر در مدت زمان کوتاه‌تر ارائه داده شده است. این در صورتی است که این دو الگوریتم در نوع و انتخاب بهترین جانمایی کارگاه با یکدیگر متفاوت بوده اما در دیگر مراحل نظیر تولید مدل بلوکی، تولید کارگاه‌های زیرزمینی مشابه یکدیگر عمل می‌کنند. الگوریتم SBO3D از چهار مرحله مجزا مطابق شکل ۳-۱ تشکیل شده است.



شکل ۳-۱: مراحل الگوریتم پیشنهادی

۳-۳- تهیه مدل بلوکی اقتصادی

ابتدا با استفاده از نرم‌افزارهای موجود معدنی و داده‌های اکتشافی نظیر عیار بلوک، نوع سنگ دربرگیرنده، چگالی و دیگر پارامترهای زمین‌شناسی مدل بلوکی عیاری ساخته شده و سپس به صورت یک فایل Excel خروجی گرفته خواهد شد. برای استفاده از فایل Excel حاصل شده از نرم‌افزار معدنی برای وارد کردن آن به الگوریتم بایستی تغییراتی در آن صورت بگیرد بدین معنی که فایل Excel اولیه که شامل اطلاعاتی نظیر ابعاد هر بلوک، عیار دیگر عناصر موجود در ذخیره معدنی و غیره باشد به یک فایل Excel چهارستونی شکل ۳-۲ که سه ستون اول مولفه X، Y و Z و ستون چهارم عیار هر بلوک می‌باشد، تغییر پیدا کند. این عمل به منظور تعریف مدل بلوکی عیاری برای الگوریتم جهت شروع فرآیند بهینه‌سازی محدوده نهایی معدن زیرزمینی می‌باشد.

	A	B	C	D
620	18	10	20	0/7386
621	18	10	22	0/586
622	18	12	6	0/7467
623	18	12	8	0/6644
624	18	12	10	0/5865
625	18	12	12	0/626
626	18	12	14	0/6609
627	18	12	16	0/7288
628	18	12	18	0/6928
629	18	12	20	0/7823
630	18	12	22	0/789
631	18	14	6	0/5824
632	18	14	8	0/7033
633	18	14	10	0/5821
634	18	14	12	0/607
635	18	14	14	0/7209
636	18	14	16	0/6627
637	18	14	18	0/4465
638	18	14	20	0/6449
639	18	14	22	0/2094
640	18	16	6	0/5523
641	18	16	8	0/6289
642	18	16	10	0/602
643	18	16	12	0/5147
644	18	16	14	0/6054
645	18	16	16	0/6485
646	18	16	18	0/4896
647	18	16	20	0/7995
648	18	16	22	0/7241

شکل ۳-۲: فایل Excel ورودی الگوریتم

پس از وارد کردن مدل بلوکی عیاری به صورت یک فایل Excel به عنوان ورودی، مدل بلوکی اقتصادی با استفاده از روابط ۲-۶ و ۲-۷ ساخته خواهد شد. روند کار در این مرحله بدین شکل است که پس از وارد کردن مدل بلوکی عیاری الگوریتم ارزش اقتصادی هر بلوک جداگانه محاسبه و پس از محاسبه ارزش اقتصادی هر بلوک این ارزش‌ها جایگزین ستون چهارم یعنی ستون عیار مربوط به هر بلوک شده و مدل بلوکی عیاری به مدل بلوکی اقتصادی

تبدیل خواهد شد. مدل بلوکی اقتصادی تحت عنوان Economic model به صورت یک فایل Excel شکل ۳-۳ در محل اجرای الگوریتم ذخیره خواهد شد.

شکل ۳-۳: مدل بلوکی اقتصادی

۳-۴- تولید کارگاه‌های محتمل زیرزمینی

برای شروع فرآیند تولید بهترین چیدمان کارگاه‌های استخراجی در ابتدا بایستی کارگاه استخراجی با توجه به محدودیت‌های فنی و استخراجی توسط کاربر برای شروع پیمایش در مدل بلوکی اقتصادی تولید شده در مرحله قبل تعریف شود. پس از تعریف کارگاه استخراجی این کارگاه در مدل بلوکی شروع به حرکت کرده و فرآیند شناور شده و تمامی کارگاه‌های احتمالی تولید خواهد شد. همانطور که در فصل قبل توضیح داده شد در الگوریتم ساندانیک برای تولید تمامی کارگاه‌های محتمل در مدل بلوکی برای سهولت انجام کار مولفه‌های i, j, k استفاده می‌شوند به این صورت که مشخصه‌های i', j', k' به عنوان بلوک آغازین و مشخصه i'', j'', k'' به عنوان بلوک پایانی در یک کارگاه و همچنین مولفه‌های $i_{max}, j_{max}, k_{max}$ مشخصه بلوک انتهایی در یک مدل بلوکی است،

تعریف خواهند شد و برای تولید کارگاه‌های احتمالی موجود در مدل بلوکی بایستی پس از تعریف ابعاد کارگاه استخراجی ابتدا بلوک آغازین و پایانی هر کارگاه شناسایی شود. پس از شناسایی بلوک آغازین و بلوک پایانی هر کارگاه با توجه به رابطه ۲-۸ که در فصل قبل آورده شده است تمام کارگاه‌های محتمل موجود در مدل بلوکی تولید خواهند شد.

در الگوریتم ارائه شده در این تحقیق با توجه مختصات هر بلوک در فضای سه‌بعدی مشخصه منحصر به فرد i, j, k برای هر بلوک تعریف خواهد شد. جهت سهولت انجام کار و همچنین صرف زمان محاسبه کمتر نسبت به الگوریتم ساندانیک فرایند شناورسازی پس از تعریف کارگاه استخراجی از پایین‌ترین بخش مدل بلوکی یعنی $i=1$ و $j=1$ و $k=1$ شروع شده و تا تولید آخرین کارگاه محتمل ادامه خواهد یافت. در این الگوریتم برای محدود کردن حرکت کارگاه استخراجی تعریف شده فقط در مدل بلوکی ابتدا طول هر راستا اندازه‌گیری شده سپس با استفاده از یک شمارشگر حرکت از ابتدای راستای X مدل بلوکی شروع شده و تا پایان هر راستا ادامه خواهد داشت. پس از تولید تمامی کارگاه‌های محتمل ارزش هر کارگاه با توجه به بلوک‌های درون هر یک محاسبه خواهد شد. محاسبه ارزش هر کارگاه به صورتی است که مجموع ارزش اقتصادی بلوک‌های درون هر کارگاه برابر ارزش هر کارگاه می‌باشد.

۳-۵- شیوه حرکت کارگاه استخراجی

پس از قرارگرفتن کارگاه استخراجی در اولین موقعیت شروع به حرکت در راستای X خواهد کرد. حرکت کارگاه حرکتی گام‌به‌گام است یعنی در هر گام فقط یک بلوک پیشروی می‌کند. پس از به پایان رساندن هر راستا کارگاه به موقعیت اولیه باز خواهد گشت اما قبل شروع حرکت یک بلوک در راستا دیگر پیشروی کرده و مجدد حرکت گام به گام در راستای X شروع خواهد شد. این روند تا پیمایش کل مدل بلوکی و تولید کل کارگاه‌های

احتمالی ادامه خواهد یافت. به عنوان مثال شکل (۳-۴) که متشکل از ۲۵ بلوک (۵ بلوک در راستای X و ۵ بلوک در راستای Y) است را در نظر بگیرید، ابتدا کارگاه استخراجی به ابعاد 3×3 (۳ بلوک در راستای X و ۳ بلوک در راستای Y) شروع به حرکت کرده شکل (۳-۵) و پس از بررسی و تولید کارگاه‌های محتمل راستای موردنظر به نقطه شروع باز خواهد گشت اما با این تفاوت که یک بلوک در راستای Y هم پیشروی کرده و مجدداً کارگاه‌های محتمل را در جهت راستای X تولید خواهد کرد. این فرایند برای حالت ۳ بعدی هم قابل استفاده است با این تفاوت که پس از بررسی راستاهای X و Y راستای Z هم بایستی در نظر گرفته شود.

۳	۱	۲	-۲۰	-۲۰
۲	۲	۵	۱	-۱۰
-۲	-۱	۴	۲	۵
-۵۰	۴	۳	-۵	۱
۶۰	-۶۰	۲	۳	۲

شکل ۳-۴: مدل بلوکی دوبعدی شامل ۲۵ بلوک

۳	۱	۲	-۲۰	-۲۰
۲	۲	۵	۱	-۱۰
-۲	-۱	۴	۲	۵
-۵۰	۴	۳	-۵	۱
۶۰	-۶۰	۲	۳	۲

کارگاه ۷

۳	۱	۲	-۲۰	-۲۰
۲	۲	۵	۱	-۱۰
-۲	-۱	۴	۲	۵
-۵۰	۴	۳	-۵	۱
۶۰	-۶۰	۲	۳	۲

کارگاه ۸

۳	۱	۲	-۲۰	-۲۰
۲	۲	۵	۱	-۱۰
-۲	-۱	۴	۲	۵
-۵۰	۴	۳	-۵	۱
۶۰	-۶۰	۲	۳	۲

کارگاه ۹

۳	۱	۲	-۲۰	-۲۰
۲	۲	۵	۱	-۱۰
-۲	-۱	۴	۲	۵
-۵۰	۴	۳	-۵	۱
۶۰	-۶۰	۲	۳	۲

کارگاه ۴

۳	۱	۲	-۲۰	-۲۰
۲	۲	۵	۱	-۱۰
-۲	-۱	۴	۲	۵
-۵۰	۴	۳	-۵	۱
۶۰	-۶۰	۲	۳	۲

کارگاه ۵

۳	۱	۲	-۲۰	-۲۰
۲	۲	۵	۱	-۱۰
-۲	-۱	۴	۲	۵
-۵۰	۴	۳	-۵	۱
۶۰	-۶۰	۲	۳	۲

کارگاه ۶

۳	۱	۲	-۲۰	-۲۰
۲	۲	۵	۱	-۱۰
-۲	-۱	۴	۲	۵
-۵۰	۴	۳	-۵	۱
۶۰	-۶۰	۲	۳	۲

کارگاه ۱

۳	۱	۲	-۲۰	-۲۰
۲	۲	۵	۱	-۱۰
-۲	-۱	۴	۲	۵
-۵۰	۴	۳	-۵	۱
۶۰	-۶۰	۲	۳	۲

کارگاه ۲

۳	۱	۲	-۲۰	-۲۰
۲	۲	۵	۱	-۱۰
-۲	-۱	۴	۲	۵
-۵۰	۴	۳	-۵	۱
۶۰	-۶۰	۲	۳	۲

کارگاه ۳

شکل ۳-۵: کارگاه‌های احتمالی به ابعاد 3×3

۳-۶- تولید مجموعه کارگاه‌های غیرهمپوشان

بعد از پیمایش کل مدل بلوکی و تولید تمام کارگاه‌های احتمالی مجموع ارزش هر کارگاه با توجه به بلوک‌های قرار گرفته در کارگاه مورد نظر محاسبه خواهد شد. پس از محاسبه ارزش هر کارگاه محتمل طبق روند الگوریتم برای تولید مجموعه کارگاه‌های غیرهمپوشان فقط کارگاه‌هایی که دارای ارزش اقتصادی مثبت هستند برای تولید مجموعه کارگاه‌های غیرهمپوشان انتخاب شده و دیگر کارگاه‌ها که ارزش اقتصادی منفی دارند از روند کار حذف خواهند شد. مطابق روند الگوریتم ساندانیک در مدل بلوکی اقتصادی شکل (۳-۵) ۳ کارگاه استخراجی ۱، ۵ و ۹ دارای ارزش اقتصادی مثبت می‌باشند اما به دلیل همپوشانی کارگاه‌ها فقط یک کارگاه استخراجی که ارزش اقتصادی بالاتری نسبت به دیگر کارگاه‌های دارای ارزش اقتصادی دارد به عنوان محدوده نهایی انتخاب خواهد شد. در الگوریتم ارائه داده شده برای تولید جواب نهایی تمامی کارگاه‌های دارای ارزش اقتصادی مثبت با هم در نظر گرفته خواهند شد یعنی کارگاه‌های دارای ارزش اقتصادی مثبت در یک مجموعه قرار خواهند گرفت. در این صورت در اکثر مواقع ممکن است ارزش بعضی از بلوک‌ها به علت قرار داشتن یک بلوک در چندین کارگاه دارای ارزش اقتصادی مثبت چند بار در محاسبات نهایی آورده شود. به منظور جلوگیری و رفع به وجود آمدن همپوشانی طبق روند الگوریتم بلوک‌هایی با مولفه‌های i, j, k یکسان که چندین بار تکرار شده‌اند حذف و کنار گذاشته خواهند شد.

-20	-20	2	1	3
-10	1	5	2	2
5	2	4	-1	-2
1	-5	3	4	-50
2	3	2	-60	60

کارگاه ۷

ارزش: -۳۱

-20	-20	2	1	3
-10	1	5	2	2
5	2	4	-1	-2
1	-5	3	4	-50
2	3	2	-60	60

کارگاه ۸

ارزش: -۴

-20	-20	2	1	3
-10	1	5	2	2
5	2	4	-1	-2
1	-5	3	4	-50
2	3	2	-60	60

کارگاه ۹

ارزش: ۱۶

-20	-20	2	1	3
-20	1	5	2	2
5	2	4	-1	-2
1	-5	3	4	-50
2	3	2	-60	60

کارگاه ۴

ارزش: -۴

-20	-20	2	1	3
-10	1	5	2	2
5	2	4	-1	-2
1	-5	3	4	-50
2	3	2	-60	60

کارگاه ۵

ارزش: ۱۵

-20	-20	2	1	3
-10	1	5	2	2
5	2	4	-1	-2
1	-5	3	4	-50
2	3	2	-60	60

کارگاه ۶

ارزش: -۳۳

-20	-20	2	1	3
-10	1	5	2	2
5	2	4	-1	-2
1	-5	3	4	-50
2	3	2	-60	60

کارگاه ۱

ارزش: ۱۷

-20	-20	2	1	3
-10	1	5	2	2
5	2	4	-1	-2
1	-5	3	4	-50
2	3	2	-60	60

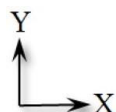
کارگاه ۲

ارزش: -۴۸

-20	-20	2	1	3
-10	1	5	2	2
5	2	4	-1	-2
1	-5	3	4	-50
2	3	2	-60	60

کارگاه ۳

ارزش: -۴۰



شکل ۳-۶: کارگاه‌های دارای ارزش اقتصادی مثبت

در مدل بلوکی دوبعدی اقتصادی شکل (۳-۳) که متشکل از ۲۵ بلوک است کارگاه استخراجی ۳×۳ شناور شده است. پس از شناور شدن در مدل بلوکی ۹ کارگاه محتمل تولید خواهد شد. در شکل (۳-۵) کارگاه‌های دارای ارزش اقتصادی منفی با رنگ خاکستری و کارگاه‌های دارای ارزش اقتصادی با رنگ سبز مشخص شده است. الگوریتم در این مثال دوبعدی فقط کارگاه‌های ۱، ۵ و ۹ را که به ترتیب دارای ارزش اقتصادی ۱۷، ۱۵ و ۱۶ و همچنین شامل ۲۷ بلوک می‌باشند را در نظر خواهد گرفت. در صورت با هم در نظر گرفتن کارگاه‌های مثبت تعدادی از بلوک‌ها چندین بار تکرار خواهند شد در ادامه برای جلوگیری از به وجود آمدن همپوشانی و محاسبه

ارزش بلوک‌های تکراری مطابق جدول (۳-۱) مختصات بلوک‌های تکراری ۳ کارگاه استخراجی دارای ارزش اقتصادی مثبت آورده شده است بلوک‌های تکراری پس از شناسایی در نهایت حذف و از روند کار کنار گذاشته خواهند شد.

جدول ۳-۱: بلوک‌های تکراری حذف شده

شماره کارگاه	مختصات X و Y بلوک‌ها
کارگاه شماره ۱	بلوک (۲،۲)
	بلوک (۳،۲)
	بلوک (۲،۳)
	بلوک (۳،۳)
کارگاه شماره ۵	بلوک (۳،۳)
کارگاه شماره ۹	بلوک (۳،۴)
	بلوک (۴،۳)
	بلوک (۴،۴)

۳-۷- ویرایش محدوده نهایی

پس از در نظر گرفتن تمام کارگاه‌های دارای ارزش اقتصادی مثبت در مرحله قبل برای بهبود جواب نهایی بلوک‌های مرزی محدوده نهایی که دارای ارزش اقتصادی غیر مثبت یعنی دارای ارزش صفر یا منفی بوده حذف خواهند شد. فرایند ویرایش محدوده نهایی به این صورت است که در تمام جهات مدل بلوکی بررسی شده و در صورت وجود بلوک غیر مثبت تا مادامی که محدودیت استخراجی وجود نداشته باشد بلوک‌های دارای ارزش اقتصادی غیر مثبت حذف خواهد شد. همچنین در شکل ۳-۷ ویرایش محدوده نهایی حاصل از مدل بلوکی شکل

۳-۳ آورده شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود محدوده نهایی قبل از ویرایش ارزش اقتصادی برابر با ۳۴

اما پس از ویرایش و حذف بلوک‌های مرزی دارای ارزش اقتصادی منفی ارزش اقتصادی این محدوده برابر با ۳۶ خواهد شد.

-20	-20	2	1	3
-10	1	5	2	2
5	2	4	-1	-2
1	-5	3	4	-50
2	3	2	-60	60

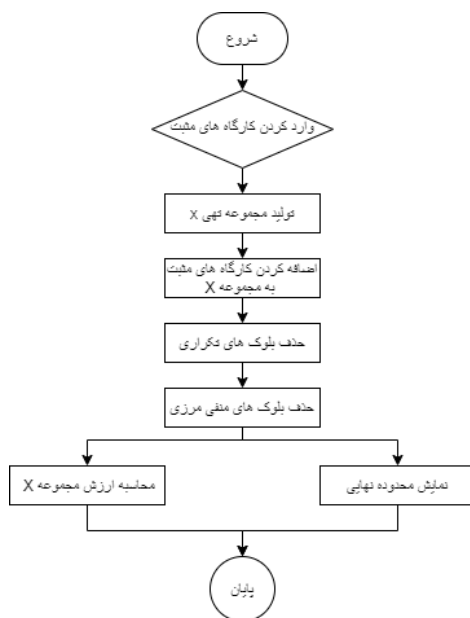
الف) محدوده نهایی قبل از ویرایش

-20	-20	2	1	3
-10	1	5	2	2
5	2	4	-1	-2
1	-5	3	4	-50
2	3	2	-60	60

ب) محدوده نهایی ویرایش شده

شکل ۳-۷: ویرایش محدوده نهایی

روند کلی و مراحل اجرای الگوریتم برای تولید محدوده نهایی در شکل ۳-۸ نشان داده شده است.



شکل ۳-۸: نمای کلی از الگوریتم پیشنهادی

۳-۸- مثال دوبعدی

در این بخش ابتدا یک مثال دوبعدی فرضی برای درک بهتر تمام مراحل الگوریتم ارائه شده و همچنین مقایسه این روش با الگوریتم ساندانیک صورت گرفته است. ابتدا با استفاده از الگوریتم ساندانیک محدوده نهایی مشخص و ارزش آن محاسبه و سپس با نتایج حاصل از استفاده از الگوریتم ارائه شده قیاس خواهد شد. در شکل (۳-۹) مدل بلوکی عیاری عنصر روی نشان داده شده است که این مدل بلوکی از ۴۲ بلوک (۷ بلوک در راستای X و ۶ بلوک در راستای Y) تشکیل شده است. برای تولید محدوده نهایی با استفاده از هر دو الگوریتم کارگاه استخراجی ۳×۳ (۳ بلوک در راستای X و ۳ بلوک در راستای Y) در نظر گرفته شده است.

0.32	0.002	1.538	0.786	0.43	0.08	0.018
0.09	0.07	0.356	0.09	1.214	0.001	0.198
1.521	0.009	0.006	0.024	0.681	1.224	0.001
0.238	0.002	1.325	4.218	0.276	0.07	0.032
0.075	0.591	0.001	0.215	0.08	3.451	0.04
0.354	0.009	0.972	0.08	0.977	0.001	1.876

شکل ۳-۹: مدل بلوکی عیاری روی (%)

با در نظر گرفتن پارامترهای اقتصادی زیر:

- قیمت ماده معدنی: ۸۰۰۰ دلار بر تن
- مجموع هزینه‌های معدنکاری و فراوری: ۳۵ دلار بر تن
- هزینه ذوب و تصفیه: ۱۷۰ دلار بر تن
- بازده: ۹۰ درصد

عیار حد برابر ۵/۰ درصد می‌باشد بنابراین با استفاده از روابط (۳-۱) و (۳-۲) ارزش اقتصادی بلوک‌ها محاسبه شده و در شکل ۳-۱۰ مدل بلوکی اقتصادی مربوط به این مدل بلوکی نشان داده شده است.

-9375	-9375	22932	6371	-9375	-9375	-9375
-9375	-9375	-9375	-9375	15797	-9375	-9375
22558	-9375	-9375	-9375	4059	15931	-9375
-9375	-9375	18241	81950	-9375	-9375	-9375
-9375	2077	-9375	-9375	-9375	65060	-9375
-9375	-9375	10467	-9375	10577	-9375	30375

شکل ۳-۱۰: مدل بلوکی اقتصادی (ارزش بلوک‌ها بر حسب دلار)

۳-۸-۱- حل مسئله با استفاده از الگوریتم ساندانیک

اگر کارگاه استخراجی 3×3 در مدل دوبعدی شکل (۳-۱۰) شناور شود ۲۰ کارگاه محتمل تولید خواهد شد که کارگاه‌های ۱، ۶، ۱۱، ۱۵، ۱۶، ۱۷، ۱۹ و ۲۰ ارزش اقتصادی منفی دارند. مشخصات تمام کارگاه‌های تولید شده در جدول (۳-۲) نشان داده شده است.

جدول ۳-۲: ارزش اقتصادی کارگاه‌های محتمل

شماره کارگاه	ارزش اقتصادی
۱	-۲۵۴۶۵
۲	۶۵۸۶۰
۳	۷۴۴۶۰
۴	۱۰۱۳۳۷
۵	۴۹۷۶۲
۶	-۱۳۳۷۴
۷	۴۶۰۱۸
۸	۴۸۰۰۰
۹	۱۲۰۱۲۵
۱۰	۲۸۸۰۰
۱۱	-۲۴۸۲۶
۱۲	۳۴۵۶۶
۱۳	۷۳۱۷۲
۱۴	۷۰۸۶۲
۱۵	-۲۰۴۶۳
۱۶	-۲۰۱۳۵
۱۷	-۳۶۳۲۲
۱۸	۳۲۸۴
۱۹	-۴۷۱۷
۲۰	-۲۰۴۶۳

پس از محاسبه ارزش کارگاه‌های محتمل تولید شده در مرحله قبل ۱۲ کارگاه از بین ۲۰ کارگاه احتمالی دارای

ارزش اقتصادی مثبت بوده و در شکل ۳-۱۱ نمایش داده شده‌اند.

81950	18241	-9375
-9375	-9375	2077
-9375	10467	-9375

کارگاه ۲

81950	18241	-9375
-9375	-9375	-9375
10577	-9375	10467

کارگاه ۳

81950	-9375	-9375
-9375	-9375	65060
-9375	10577	-9375

کارگاه ۴

-9375	-9375	-9375
-9375	65060	-9375
10577	-9375	30375

کارگاه ۵

-9375	-9375	-9375
-9375	18241	81950
2077	-9375	-9375

کارگاه ۷

-9375	-9375	4059
18241	81950	-9375
-9375	-9375	-9375

کارگاه ۸

-9375	4059	5931
81950	-9375	-9375
-9375	-9375	65060

کارگاه ۹

4059	5931	-9375
-9375	-9375	-9375
-9375	65060	-9375

کارگاه ۱۰

-9375	-9375	-9375
-9375	-9375	-9375
-9375	18241	81950

کارگاه ۱۲

-9375	-9375	15797
-9375	-9375	4059
18241	81950	-9375

کارگاه ۱۳

-9375	15797	-9375
-9375	4059	5931
81950	-9375	-9375

کارگاه ۱۴

22932	6371	-9375
-9375	-9375	15797
-9375	-9375	4059

کارگاه ۱۸

شکل ۳-۱۱: کارگاه‌های محتمل با ارزش اقتصادی مثبت

الگوریتم ساندانیک برای مشخص نمودن محدوده نهایی طی ۹ مرحله که در فصل دوم توضیح داده شد کارگاه‌های

مثبت غیرهمپوشان را مطابق جدول ۳-۳ در مجموعه‌های جداگانه قرار می‌دهد.

ارزش اقتصادی (دلار)	مجموعه‌های F_k
۶۵۸۶۰	$\{S_2\}$
۷۴۳۶۰	$\{S_3\}$
۱۰۱۳۳۷	$\{S_4\}$
۴۹۷۶۲	$\{S_5\}$
۴۶۰۱۸	$\{S_7\}$
۴۸۰۰۰	$\{S_8\}$
۱۱۰۱۲۵	$\{S_9\}$
۱۸۸۰۰	$\{S_{10}\}$
۳۴۵۶۶	$\{S_{12}\}$
۷۳۱۷۲	$\{S_{13}\}$
۷۰۸۶۲	$\{S_{14}\}$
۲۲۸۴	$\{S_{18}\}$
۱۱۷۹۰۶	$\{S_{18}, S_5, S_2\}$
۷۶۶۴۴	$\{S_{18}, S_3\}$
۱۰۳۶۲۱	$\{S_{18}, S_4\}$
۶۴۸۱۸	$\{S_{10}, S_7\}$

جدول ۳-۳: مشخصات و ارزش اقتصادی هر یک از مجموعه‌های محدوده نهایی

با توجه به جدول (۳-۳) با ارزش‌ترین مجموعه را به‌عنوان محدوده نهایی انتخاب و در شکل (۳-۱۲) نشان داده شده و در نهایت مرزهای محدوده نهایی با توجه به وجود بلوک‌های دارای ارزش اقتصادی منفی ویرایش خواهد شد. جواب نهایی مسئله به صورت شکل ۳-۱۳ خواهد بود که در این شکل بلوک‌های قرار گرفته در محدوده

نهایی با رنگ خاکستری و بلوک‌های مرزی دارای ارزش منفی با رنگ زرد مشخص شده و ارزش نهایی محدوده نهایی پس از ویرایش برابر با ۱۲۷۲۸۱ است.

-9375	-9375	22932	6371	-9375	-9375	-9375
-9375	-9375	-9375	-9375	15797	-9375	-9375
22558	-9375	-9375	-9375	4059	15931	-9375
-9375	-9375	18241	81950	-9375	-9375	-9375
-9375	2077	-9375	-9375	-9375	65060	-9375
-9375	-9375	10467	-9375	10577	-9375	30375

شکل ۳-۱۲: محدوده بهینه قبل از ویرایش

-9375	-9375	22932	6371	-9375	-9375	-9375
-9375	-9375	-9375	-9375	15797	-9375	-9375
22558	-9375	-9375	-9375	4059	15931	-9375
-9375	-9375	18241	81950	-9375	-9375	-9375
-9375	2077	-9375	-9375	-9375	65060	-9375
-9375	-9375	10467	-9375	10577	-9375	30375

شکل ۳-۱۳: محدوده نهایی حاصل از استفاده از الگوریتم ساندانیک پس از ویرایش

۳-۸-۲- حل مسئله با استفاده از الگوریتم SBO3D

از آنجایی که این روش بهبودی از الگوریتم ساندانیک می‌باشد نتیجتاً حل مسئله توسط الگوریتم ارائه داده شده در اکثر مراحل مشابه الگوریتم ساندانیک می‌باشد. تنها تفاوت این دو روش در تولید محدوده نهایی بوده که باعث اختلاف اقتصادی چشمگیری می‌شود. این روش مانند الگوریتم ساندانیک پس از شناورسازی کارگاه استخراجی در مدل دو بعدی اقتصادی ۲۰ کارگاه محتمل تولید و ارزش اقتصادی هر یک محاسبه خواهد شد. در این روش برای تولید محدوده نهایی ۱۲ کارگاه دارای ارزش اقتصادی مثبت با هم در نظر گرفته خواهد شد شکل

(۳-۱۴) در این صورت بایستی بلوک‌هایی که ارزش آن‌ها چندین بار در نظر گرفته شده، حذف شوند و محدوده نهایی جهت ویرایش و حذف بلوک‌های مرزی دارای ارزش منفی به مرحله بعد خواهد رفت. جواب نهایی این مسئله توسط الگوریتم ارائه شده به صورت شکل ۳-۱۵ بوده و ارزش نهایی حاصله برابر با ۱۴۳۲۱۲ است.

-9375	-9375	22932	6371	-9375	-9375	-9375
-9375	-9375	-9375	-9375	15797	-9375	-9375
22558	-9375	-9375	-9375	4059	15931	-9375
-9375	-9375	18241	81950	-9375	-9375	-9375
-9375	2077	-9375	-9375	-9375	65060	-9375
-9375	-9375	10467	-9375	10577	-9375	30375

شکل ۳-۱۴: محدوده بهینه قبل از ویرایش

-9375	-9375	22932	6371	-9375	-9375	-9375
-9375	-9375	-9375	-9375	15797	-9375	-9375
22558	-9375	-9375	-9375	4059	15931	-9375
-9375	-9375	18241	81950	-9375	-9375	-9375
-9375	2077	-9375	-9375	-9375	65060	-9375
-9375	-9375	10467	-9375	10577	-9375	30375

شکل ۳-۱۵: محدوده نهایی حاصل از استفاده از الگوریتم پیشنهادی

۳-۱۰- برنامه‌نویسی الگوریتم

الگوریتم SBO3D با زبان برنامه‌نویسی Python توسعه داده شده است. Python یک زبان برنامه‌نویسی شی گرا، تفسیری، سطح بالا و همه منظوره است که توسط فان روسوم^۱ آن را طراحی کرده است و اولین بار در سال ۱۹۹۱ منتشر شده‌است. فلسفه اصلی طراحی پایتون «خوانایی بالای کد» است و نویسه‌های فاصله خالی در

۱. Van rossum

آن معنادار هستند و مکرر استفاده می‌شوند. ساختار زبانی و دیدگاه شی‌گرا در پایتون به گونه‌ای طراحی شده‌است که به برنامه‌نویس امکان نوشتن کد منطقی و واضح (بدون ابهام) را برای پروژه‌های کوچک و بزرگ می‌دهد. کلمات کلیدی و اصلی این زبان به صورت حداقلی تهیه شده‌اند و در مقابل کتابخانه‌هایی که در اختیار کاربر است بسیار وسیع هستند. برخلاف برخی زبان‌های برنامه‌نویسی رایج دیگر که بلاک‌های کد در آکولاد تعریف می‌شوند (به‌ویژه زبان‌هایی که از نحو زبان C پیروی می‌کنند) در زبان پایتون از نویسه فاصله و جلو بردن متن برنامه برای مشخص کردن بلاک‌های کد استفاده می‌شود. به این معنی که تعدادی یکسان از نویسه فاصله در ابتدای سطرها هر بلاک قرار می‌گیرند و این تعداد در بلاک‌های کد درونی‌تر افزایش می‌یابد. بدین ترتیب بلاک‌های کد به صورت خودکار ظاهری مرتب دارند. در پایتون مدل‌های مختلف برنامه‌نویسی (از جمله شی‌گرا و برنامه‌نویسی دستوری و تابع محور) را پشتیبانی می‌شود و برای مشخص کردن نوع متغیرها از یک سامانه پویا استفاده می‌شود. در برنامه‌نویسی این الگوریتم سعی شده است زمان اجرای الگوریتم کمترین میزان ممکن خود را داشته باشد.

۳-۱۰-۱- ورودی الگوریتم

برای اجرای الگوریتم در محیط زبان برنامه‌نویسی Python نرم‌افزار کاربر دوست تحت عنوان SBO3D شکل ۳-۱۶ توسعه داده شده است. برای اجرای برنامه بایستی ورودی‌های مربوطه جدول ۳-۴ نظیر پارامترهای اقتصادی به عنوان مثال هزینه‌های معدنکاری، هزینه فرآوری و همچنین قیمت ماده معدنی و تناژ را وارد کرد. پس از وارد کردن تمام پارامترها بایستی مدل بلوکی عیاری فراخوانی شود تا نرم‌افزار شروع به محاسبه محدوده نهایی کند.

شکل ۳-۱۶: نرم‌افزار کامپیوتری تعیین محدوده بهینه استخراج معادن زیرزمینی

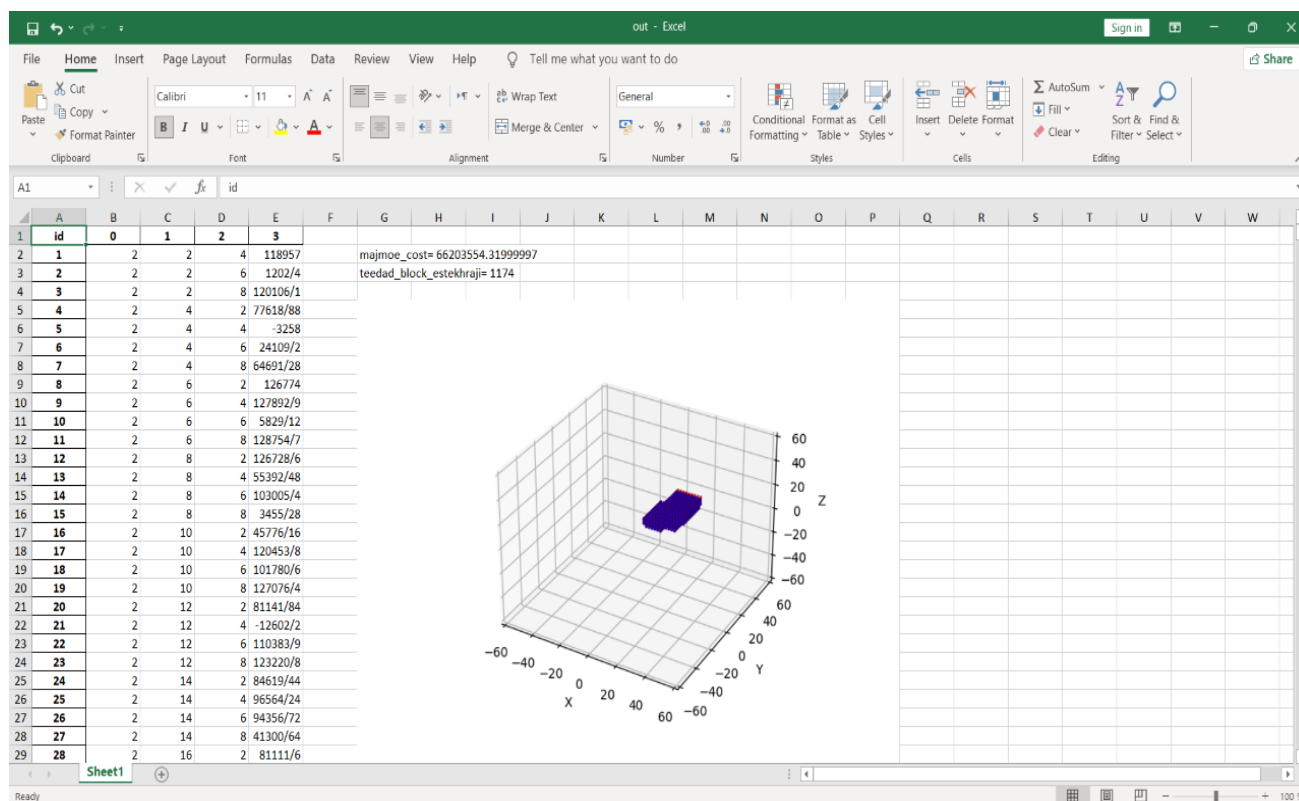
جدول ۳-۴ پارامترهای ورودی الگوریتم

Metal Price	قیمت (دلار بر تن فلز)
Processing Cost	هزینه‌های فرآوری (دلار بر تن ماده معدنی)
Recovery	راندمان (%)
Mining Cost	هزینه‌های معدنکاری (دلار بر تن ماده معدنی)
Refining Cost	هزینه ذوب و تصفیه (دلار بر تن فلز)
Tonnage of Block	تناژ بلوک (تن)
Block Size (X)	اندازه بلوک در راستای X
Block Size (Y)	اندازه بلوک در راستای Y
Block Size (Z)	اندازه بلوک در راستای Z
Number of X Blocks	اندازه کارگاه در راستای X
Number of Y Blocks	اندازه کارگاه در راستای Y
Number of Z Blocks	اندازه کارگاه در راستای Z
Cut-Off grade	عیار حد

۳-۱۰-۲- خروجی الگوریتم

پس از اجرای الگوریتم فایل Excel به نام Out در محل اجرای برنامه که حاوی بلوک‌های قرار گرفته در محدوده نهایی، ارزش اقتصادی کل محدوده نهایی و یک تصویر از محدوده نهایی شکل (۳-۱۵) و همچنین مدل بلوکی اقتصادی به صورت یک فایل Excel با نام Economic model در محل اجرای برنامه ذخیره خواهد شد.

پس از اجرای الگوریتم فایل Excel به نام Final layout در محل اجرای برنامه که حاوی بلوک‌های قرار گرفته در محدوده نهایی، ارزش اقتصادی کل محدوده نهایی و یک تصویر از محدوده نهایی شکل (۳-۱۷) و همچنین مدل بلوکی اقتصادی به صورت یک فایل Excel با نام Economic model در محل اجرای برنامه ذخیره خواهد شد.



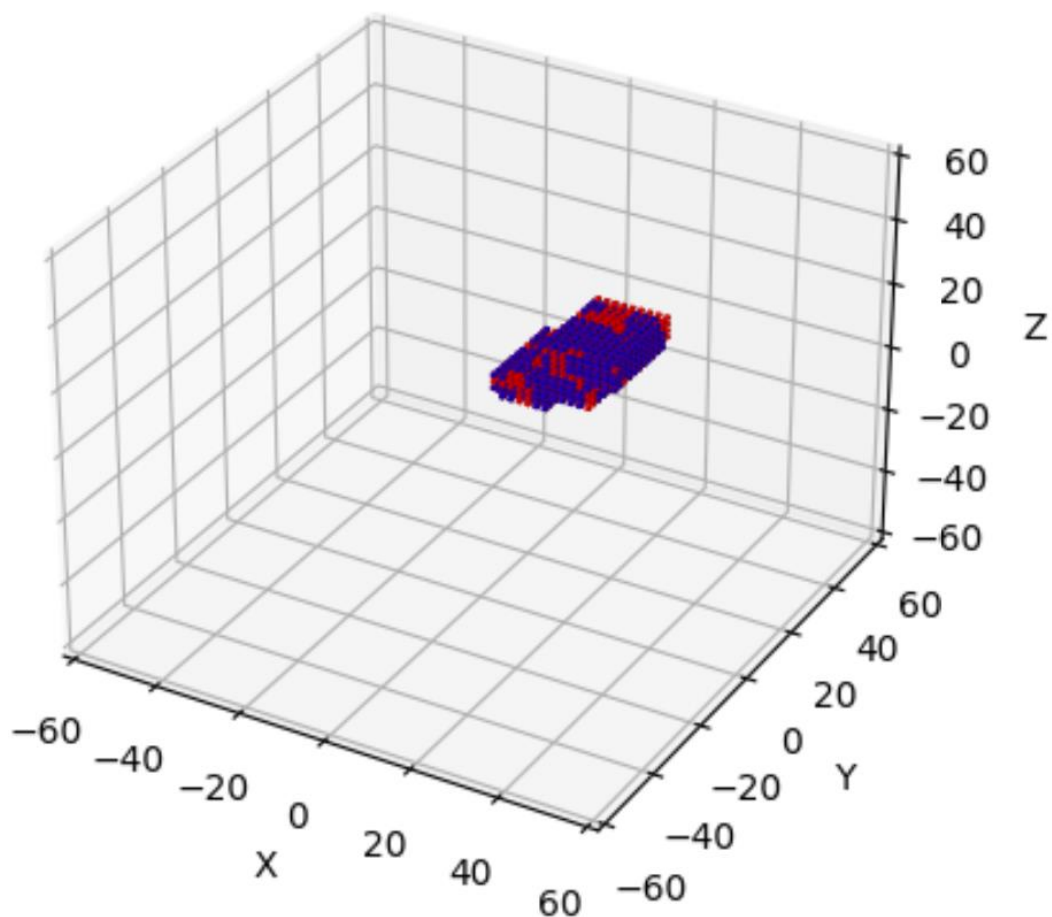
شکل ۳-۱۷: فایل خروجی الگوریتم

۳-۱۱- مطالعه موردی

معدن سرب و روی انگوران واقع در شهرستان ماهشان و در ۱۳۵ کیلومتری غرب شهر زنجان واقع شده است. این معدن در موقعیت ۳۶ درجه و ۳۷ دقیقه شمالی و ۴۷ درجه و ۲۴ دقیقه شرقی واقع است. نزدیک‌ترین روستا به معدن روستای قلعه جوق با جمعیت ۲۰۰ نفر و نزدیک‌ترین شهر به آن دندی با جمعیت پنج هزار نفر می‌باشد. راه اصلی دسترسی (زنجان، دندی، معدن) دارای مسافتی در حدود ۱۲۰ کیلومتر است. اختلاف درجه حرارت در شبانه‌روز و همچنین بین فصول سرد و گرم در محل معدن زیاد است. تعداد شاغلین مجتمع معدنی انگوران به طور متوسط ۵۰۰ نفر می‌باشد. میزان ذخایر معدن انگوران در بخش روباز هشت میلیون تن و در بخش زیرزمینی چهار میلیون تن روی با عیار بالا است. با احتساب استخراج سالانه یک میلیون تن ماده معدنی عمر باقی‌مانده معدن انگوران ۱۲ سال دیگر تمام می‌شود. معدن "انگوران" از نظر عیار بالای فلز محتوی، از معادن نادر در جهان است.

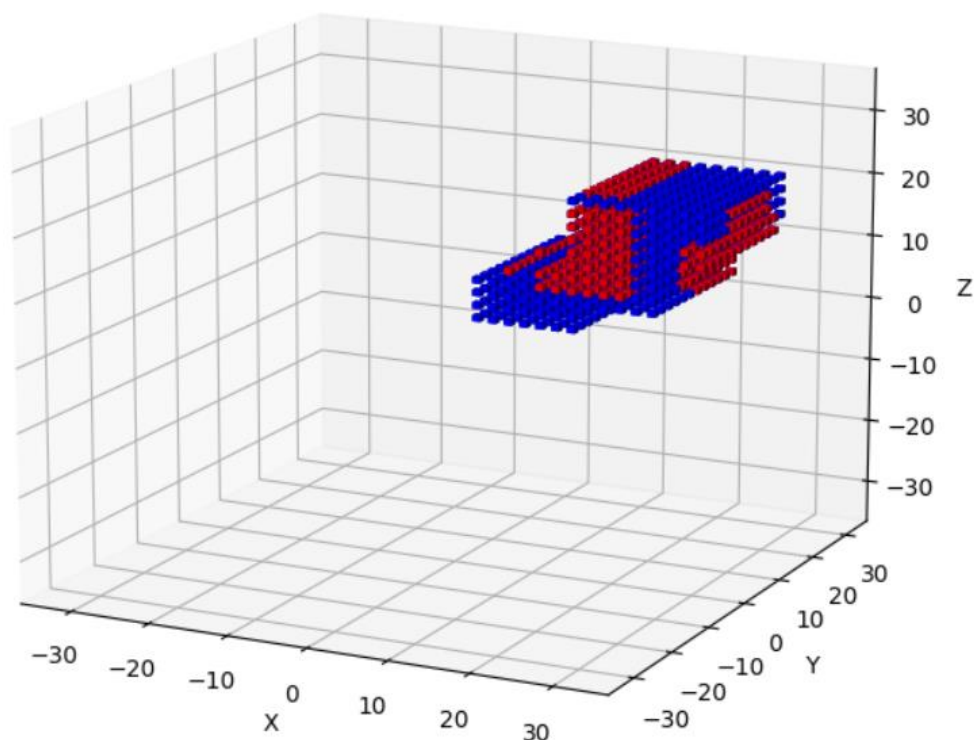
۳-۱۲- مدل سه‌بعدی

در این قسمت، با توجه به الگوریتم پیشنهاد شده در قسمت‌های قبل با در نظر گرفتن داده‌های اقتصادی فرضی محدوده معدنکاری زیرزمینی برای بخشی از معدن سرب و روی انگوران تعیین شده است. در این بخش از کانسار ۱۱۸۸ بلوک تعریف شده است که برای تعیین محدوده نهایی با استفاده از الگوریتم ارائه شده کارگاهی با ابعاد $10 \times 2 \times 2$ (۱۰ بلوک در راستای X، ۲ بلوک در راستای Y و ۲ بلوک در راستای Z) شناور شده پس از اجرای سایر مراحل الگوریتم محدوده نهایی متشکل از ۹۵۹ بلوک به ارزش ۲۶۷۱۸۴۸ دلار به دست آمده است. در شکل ۳-۱۸ این محدوده نهایی که با دو رنگ قرمز و آبی که به ترتیب ماده معدنی و باطله می‌باشند، نشان داده شده است.



شکل ۳-۱۸: شکل سه‌بعدی محدوده نهایی

در صورتی که در شرایط برابر یعنی پارامترهای ورودی مشابه و مشخصات کارگاه استخراجی به ابعاد $10 \times 2 \times 2$ (۱۰ بلوک در راستای X، ۲ بلوک در راستای Y و ۲ بلوک در راستای Z) با استفاده از الگوریتم ساندانیک محدوده نهایی متشکل از ۵۸۵ بلوک به ارزش ۱۸۷۰۲۹۳ دلار شکل ۳-۱۹ حاصل خواهد شد.



شکل ۳-۱۹: محدوده نهایی محاسبه شده با استفاده از الگوریتم ساندانیک

۳-۱۳-جمع‌بندی

تعیین محدوده نهایی معادن زیرزمینی بخش حیاتی از طراحی و برنامه‌ریزی تولید معادن می‌باشد که بایستی به آن توجه ویژه‌ای صورت گیرد. در چند دهه گذشته الگوریتم‌های مختلفی در این راستا ارائه شده است. در این فصل الگوریتمی بر مبنای الگوریتم سنس و توپال و الگوریتم ساندانیک با نام SBO3D ارائه شده است. الگوریتم پیشنهادی از چهار مرحله اصلی تبدیل مدل بلوکی عیاری به مدل بلوکی اقتصادی، تولید کارگاه‌های محتمل، کنار هم قراردادن کارگاه‌های احتمالی با ارزش مثبت و حذف بلوک‌های مرزی با ارزش منفی، تشکیل شده است. تفاوت اصلی الگوریتم پیشنهادی با الگوریتم ساندانیک در تولید محدوده نهایی می‌باشد. این تفاوت باعث اختلاف سودآوری زیادی خواهد شد در مطالعه موردی که از معدن سرب و روی انگوران به عمل آمد با

استفاده از الگوریتم SBO3D ارزش اقتصادی محدوده نهایی استنتاج شده ۴۲٪ سود به دست آمده از الگوریتم ساندانیک بهتر می‌باشد.

فصل چهارم:

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۴-۱- مقدمه

منابع معدنی جز منابع تجدیدناپذیر می‌باشند و صنعت پیرایه‌گری می‌باشد بنابراین بایستی در استفاده و بهره‌برداری از معادن نهایت دقت را به کار گرفت. معادن به دو صورت روباز و زیرزمینی استخراج می‌شوند در هر دو حالت بایستی طراحی و برنامه‌ریزی تولید دقیقی صورت بگیرد در همین راستا الگوریتم‌هایی برای این موضوع پیشنهاد شده است. در این پایان‌نامه الگوریتمی بر مبنی دو الگوریتم سنس و توپال و الگوریتم ساندانیک توسعه داده شده است.

۴-۲- نتایج

با توجه به حساسیت صنعت معدنکاری این صنعت نیازمند توجه ویژه‌ای می‌باشد. یکی از زمینه‌های مهم و حیاتی هر معدن انتخاب محدوده نهایی است که سودآوری بیشتری داشته باشد. در این پایان‌نامه الگوریتمی تحت عنوان SBO3D در راستای این امر توسعه داده شد. این الگوریتم بر مبنی دو الگوریتم سنس و توپال و الگوریتم ساندانیک می‌باشد. الگوریتم SBO3D بهبودی از الگوریتم ساندانیک می‌باشد به صورتی که چندین مرحله از این دو الگوریتم مشابه یکدیگر و فقط در مرحله انتخاب و محاسبه محدوده نهایی نسبت به هم دارای تفاوت می‌باشند. در این الگوریتم SBO3D و الگوریتم ساندانیک در محیط زبان برنامه‌نویسی Python کدنویسی شده و جهت مقایسه با

یکدیگر از اطلاعات مربوط به معدن انگوران استفاده شده و پس از اجرای برنامه‌های کدنویسی شده در محیط زبان Python الگوریتم SBO3D دارای نتایجی بوده که سود بیشتری نسبت به الگوریتم ساندانیک تولید کرده است. علاوه بر سودآوری بیشتر نسبت الگوریتم ساندانیک این الگوریتم زمان محاسبه کمتری را نیاز داشته و همچنین برای نمایش گرافیکی محدوده نهایی به صورت مستقل عمل کرده و برای این موضوع از دیگر برنامه‌های کامپیوتری بی‌نیاز است. در جدول ۴-۱ دو الگوریتم SBO3D و الگوریتم با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

جدول ۴-۱: مقایسه دو الگوریتم SBO3D و الگوریتم ساندانیک

الگوریتم ساندانیک	الگوریتم SBO3D	
زیاد	کم	زمان محاسبه محدوده نهایی
کمتر	بیشتر	ارزش محدوده نهایی نسبت الگوریتم دیگر
کم	زیاد	قابلیت فهم الگوریتم
ندارد	دارد	توانایی تولید شکل سه بعدی

۴-۳-پیشنهادهات

با توجه به این که برای تولید کارگاه‌های محتمل استخراجی نیاز به شناورسازی یک کارگاه استخراجی می‌باشد انتخاب و تعیین ابعاد کارگاه برای تولید کارگاه‌های استخراجی احتمالی نیازمند توجه ویژه جهت محاسبه ابعاد بهینه کارگاه با توجه به محدودیت‌های فنی و اقتصادی می‌باشد. الگوریتم‌های موجود نظیر الگوریتم ساندانیک و الگوریتم SBO3D صرفاً محدوده نهایی معادن تک فلزی را محاسبه می‌کند اما این صنعت نیازمند ارائه الگوریتم‌هایی برای معادن چند فلزی هم می‌باشد.

الگوریتم SBO3D در مرحله انتخاب کارگاه‌های استخراجی برای تولید محدوده نهایی به این صورت که تمام کارگاه‌های مثبت را مطابق شکل ۴-۱ در نظر می‌گیرد و سپس دیگر مراحل دیگر اجرا خواهند شد. این در صورتی

است اگر یک یا چند بلوک با ارزش در کنار محدوده نهایی تولید شده توسط الگوریتم وجود داشته باشد برای سودآوری بیشتر می‌توان با توجه به محدودیت‌های فنی استخراجی آن‌ها را به محدوده نهایی اضافه کرد.

-9375	-9375	22932	6371	-9375	-9375	-9375
-9375	-9375	-9375	-9375	15797	-9375	-9375
22558	-9375	-9375	-9375	4059	15931	-9375
-9375	-9375	18241	81950	-9375	-9375	-9375
-9375	2077	-9375	-9375	-9375	65060	-9375
-9375	-9375	10467	-9375	10577	-9375	30375

شکل ۴-۱: محدوده بهینه قبل از ویرایش

در این مدل بلوکی اقتصادی بلوک دارای مشخصات $X=1$ و $Y=4$ دارای ارزش اقتصادی مثبت بوده و قابلیت اضافه شدن به محدوده نهایی را دارد.

منابع

جلالی. س.م.ا، عطایی پور. م، شهریار. ک، الهی. ا، نیکبین. و، (۱۳۹۵) "برنامه کامپیوتری تعیین محدوده بهینه استخراج زیرزمینی GOUMA-CP" نشریه علمی - پژوهشی مهندسی عمران و محیط زیست، دوره ۴۸، شماره ۴، صفحات ۴۹۰-۴۷۵

جلالی. س.م.ا، (۱۳۸۵) رساله دکتری، "بهینه سازی محدوده نهایی معادن زیرزمینی در کانسارهای رگه ای" دانشگاه صنعتی امیرکبیر

جلالی. س.م.ا، و حسینی. س.ه، (۱۳۸۸) "بهینه سازی محدوده استخراج در معادن زیرزمینی با استفاده از الگوریتم حریصانه" نشریه علمی - پژوهشی مهندسی معدن، دوره ۴، شماره ۷، صفحات ۱۱-۱. ستوده. ف ۱۳۹۶، بهینه سازی برنامه ریزی تولید معادن زیرزمینی به روش استخراج از طبقات فرعی با استفاده از مدل سازی عددی، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود.

عطایی. م، (۱۳۸۴) "روش های تخریبی در معدنکاری زیرزمینی" انتشارات دانشگاه صنعتی شاهرود
میرزائیان. ی و عطایی پور. م، (۱۳۹۰) "بهینه سازی هندسه کارگاه زیرزمینی با استفاده از تقرب تابع خطی شکسته و حل برنامه ریزی عدد صحیح" نشریه علمی - پژوهشی مهندسی عمران و محیط زیست، دوره ۴۳، شماره ۱، صفحات ۸۷-۷۹

نیکبین، و ۱۳۹۱، بهینه سازی محدوده معدنکاری زیرزمینی برای روش های تخریب در طبقات فرعی و استخراج از طبقات فرعی، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود.

Alford, C. (1995) " Optimization in underground mine design". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts* (Vol. 5, No. 33, p. 220A).

Ataee-pour M., (1997) "A New Heuristic Algorithm to optimize Stope Boundaries", *Proceedings of the 2nd Regional APCOM Symposium on Computer Applications in the Mineral Industry, Moscow, Russia.*

Bai, X. Y., Marcotte, D., & Simon, R. (2013) "Underground stope optimization with network flow method" *Computers & Geosciences*, 52, 361-371.

CAE Studio 3. (2014) software available at <http://www.cae.com/mining/>

Cawres, I. (2001) "Multiple Pass Floating Stope Process" *Paper presented at the 4th Biennial Strategic Mine Planning Conference*, Melbourne.

Cheimanoff, N. M., Deliac, E. P., & Mallet, J. L. (1989) " GEOCAD: an alternative CAD and artificial intelligence tool that helps moving from geological resources to mineable reserves" *21st International Symposium on the Application of Computers and Operations Research in the Mineral industry* (pp. 471-478)

Dimitrakopoulos, R., Grieco, N. (2009) "Stope design and geological uncertainty: quantification of risk in conventional designs and probabilistic alternative" *Journal of Mining Science*, 45(2), 152-163

Grieco, N., & Dimitrakopoulos, R. (2007) "Managing grade risk in stope design optimization: probabilistic programming model and application in sublevel stoping" *Mining technology*, 116(2), 49-57.

Julin, D. E. 1974. Future developments in block caving. Skilling's Mining Review

Nhleko, A., Tholana, T., & Neingo, P. (2018). A review of underground stope boundary optimization algorithms. *Resources Policy*, 56, 59–69. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2017.12.004>

Nikbin, V., Ataee-pour, M., Shahriar, K., Pourrahimian, Y., (2018a), "A 3D approximate hybrid algorithm for stope boundary optimization", *Computer and Operation Research*, © Elsevier, Online

Nikbin, V., Ataee-pour, M., Shahriar, K., Pourrahimian, Y., and MirHassani, S. A., (2018b), "Stope boundary optimization: A mathematical model and efficient heuristics", *Resources Policy*, © Elsevier, Online

Ovanic, J., & Young, D. S. (1995) " Economic optimization of stope geometry using separable programming with special branch and bound techniques" *Paper presented at the 3rd Canadian Conference on Computer Applications in the Mineral Industry McGill University.*

Riddle, J. M. (1977) "A dynamic programming solution of a block-caving mine layout" *in proceeding of the 14th international Symposium on Application of Mining, Metallurgy and Exploration* (pp. 767-780).

Sens J, Topal E., (2008) "A new algorithm for stope boundary optimisation", *The AusIMM New Leaders Conference. Brisbane, Australia*, PP 25-28.

Sandanayake, D. S. S., Topal, E., Asad, M.W.A., (2015a), "A heuristic approach to optimal design of an underground mine stope layout", *Appl. Soft Comput.* 30, 595–603.

Sandanayake, D. S. S., Topal, E., & Asad, M. W.A. (2015b) " Designing an optimal stope layout for underground mining based on a heuristic algorithm" *International Journal of Mining Science and Technology*, 25(5), 767-772.

Sandanayake, D.S.S. , 2014. Stope Boundary Optimization in Underground Mining Based on a Heuristic Approach Ph.D Thesis. Curtin University, Western Aus- tralian School of Mines

Sens, J., and Topal, E. (2010) " A new algorithm for stop boundary optimization" *Proceedings of new Leaders. Australasian Institute of Mining and Metallurgy*, 25-28.

Sotoudeh, F, Kakaie, R & Ataei, M 2017, 'Development of a computer program for underground mine stope optimisation using a heuristic algorithm', in M Hudyma & Y Potvin (eds), *Proceedings of the First International Conference on Underground Mining Technology*, Australian Centre for Geomechanics, Perth, pp. 689-700

Villalba Matamoros, M. E. & Kumral, M. (2019), “Underground mine planning: stope layout optimisation under grade uncertainty using genetic algorithms”, *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 33:5, 353-370

.

Abstract

Optimization is one of the most critical aspects of the design and planning process. This is because most methods and algorithms belong to open-pit mines, which caused many researchers to argue that the Optimization of open-pit mines has reached saturation. In recent decades, the Optimization of underground mines has been considered by focusing on three main fields, including the Optimization of stope boundaries. This research aims to improve and develop an algorithm based on Sens and Topal algorithm and Sandanayake algorithm. In this research, an algorithm for the determination of the final area of underground mines is presented. The proposed algorithm consists of four main steps in generating an economic block model, generating possible stopes, considering all the positive economic value of each other, and finally removal of blocks which have been repeated several times in final value calculations. This algorithm is coded in the PYTHON environment language. Also, in the last part of this research, this algorithm is compared with the Sandanayake algorithm. Eventually, this algorithm was compared in three dimensions with the Sandanayake algorithm, which resulted in 42% more profitability than the Sandanayake algorithm.

Key words: Optimization, Optimisation of stope boundaries, Positive economic value, Sandanayake algorithm



Shahrood University of Technology
Faculty of Mining, petroleum and Geophysics Engineering

M.Sc. Thesis in Mineral Exploitation

**Development of a computer software to determine the final
stope boundaries of underground mines**

By: Reza Rezaianfard

Supervisor(s):

Dr. Mohammad Ataei

Dr. Reza kakaei

Co-Supervisor:

Dr. Yashar Pourrahimian

October, 2021